

THÈSE

présentée à l'Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse
pour l'obtention du grade de Docteur

SPÉCIALITÉ : Géographie

École Doctorale 537 « Culture et Patrimoine »

Estimation et analyse spatiales des émissions de polluants de transports individualisés Évaluation des performances environnementales d'un Transport à la Demande

par

Julie PRUD'HOMME

Soutenue publiquement en octobre 2013 devant un jury composé de :

M. Michel ANDRÉ	Directeur de recherche IFSTTAR	Rapporteur
M. Giovanni FUSCO	Chargé de recherche CNRS, Université de Nice	Examineur
M. Cyrille GENRE-GRANDPIERRE	Maître de conférence, Université d'Avignon	Examineur
M. Jérôme GENSEL	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble 1	Examineur
M. Alain GUILLAS	Directeur de Prorensoft	Examineur
M. Didier JOSSELIN	Directeur de recherche CNRS, Université d'Avignon	Directeur de thèse
M. Thomas THÉVENIN	Professeur, Université de Bourgogne	Rapporteur
M ^{me} Marie-Hélène VANDERSMISSEN	Professeur, Université Laval, Québec (Canada)	Examineur

Remerciements

En premier lieu, j'adresse mes sincères remerciements à Didier Josselin (DR CNRS), directeur de cette thèse, qui a proposé ce sujet de recherche et qui n'a pas hésité à m'accorder sa confiance durant ces quatre années. Les discussions, qu'on a eu l'occasion d'avoir, ont toujours été pleines d'enseignements pour moi. Mes remerciements vont également à Cyrille Genre-Grandpierre (MCF à l'Université d'Avignon) qui a accepté de consacrer de son temps pour m'orienter dans mon travail et à me remettre dans les rails quand cela était approprié. Toute ma reconnaissance à tous les deux.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien financier de l'Union Européenne au travers des fonds FEDER. La participation de l'entreprise Prorentsoft a elle aussi été déterminante.

Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté la lourde tâche d'évaluer ce travail. J'espère que la lecture de ce manuscrit leur sera agréable.

Je n'aurai pas pu mener ces recherches à bien sans l'accueil et le support de toute l'équipe du laboratoire de l'UMR ESPACE d'Avignon. Les échanges variés qu'on a pu avoir m'ont permis de sortir de temps en temps de mon sujet de recherche et de rester au contact du reste de la géographie. Grand merci à tous.

Je remercie Alain Guillas, directeur de Prorentsoft, pour son soutien et Sylvain Saunier, informaticien chez Prorensoft, pour sa disponibilité lors des urgences.

Le modèle GREEN ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui sans l'appui sans failles de Rémi Prud'homme, qui a donné beaucoup de son temps libre pour le faire aboutir. Un très grand merci.

Je tiens également à remercier Yves Crozet, du Laboratoire d'économie des transports (Lyon 2), de m'avoir accordé de son temps pour m'exposer son approche d'économiste sur la question de la mobilité durable. Michel André, de l'IFSTTAR, a lui aussi eu la gentillesse de répondre ponctuellement à mes interrogations sur le fonctionnement du modèle d'émission. Je les remercie tous deux d'avoir accepté, à un moment, de participer à la progression de mon travail.

Mes remerciements vont également à Loïc Petigny, doctorant en chimie à l'Université d'Avignon, qui a réussi à m'expliquer simplement le mécanisme de production des polluants dans le moteur à explosion.

Ce travail de thèse a été un marathon qui ne s'est fait ni sans embuches, ni dans la solitude. La confiance de certains, le support moral d'autres ont contribué son aboutissement. Je suis reconnaissante envers tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont permis de vivre cette fabuleuse aventure jusqu'à son terme. Je remercie tous ceux qui m'ont soutenue durant ces quatre années.

Je remercie particulièrement Maxime et Igor pour les longues et intéressantes discussions qu'on a pu avoir sur de sujets toujours plus variés et pour leur soutien moral dans les moments les moins faciles. Je remercie Nathalie « super-Nath » qui a toujours trouvé des solutions aux petits problèmes variés et pour sa disponibilité. Je remercie Chloé qui, à plusieurs reprises, a accepté de me donner son avis éclairé sur mes travaux graphiques.

Ce travail a été, en quelque sorte, une entreprise familiale, dans laquelle tous ont pris place. Je ne les remercierais jamais assez de leur investissement et de leur support inconditionnel.

Sommaire

Remerciements	5
Sommaire.....	9
Introduction générale.....	11
 Partie I.L'étude des impacts environnementaux des transports routiers dans un contexte de durabilité : vers des transports durables ?.....	17
Introduction	19
Chapitre 1 Un contexte de développement durable.....	20
1. Petite histoire du développement durable – vers une chronologie comparée.....	22
2. Convergences et divergences des enjeux : aller vers un consensus et une implication forte des populations concernées.....	40
Conclusion.....	50
Chapitre 2 La mobilité durable.....	53
1. Vers une ville durable	53
2. Pour une mobilité durable	57
Conclusions sur le transport durable.....	74
Chapitre 3 Les TAD, une réponse à la durabilité ?.....	75
1. Quelques repères sur les transports à la demande.....	75
2. TAD et durabilité : premiers éléments	81
Chapitre 4 L'estimation des émissions de polluants par les véhicules à moteur thermique.....	89
1. Mécanismes en jeu dans la création des polluants par les moteurs	89
2. Différentes modélisations des émissions de polluants	94
Synthèse de la Partie I.....	104
 Partie II.Prendre en compte les composantes techniques et géographiques des systèmes de transport pour mieux évaluer les émissions	107
Introduction	109
Chapitre 5 Des leviers d'action structurels pour optimiser les performances environnementales des TAD.....	111
1. La configuration spatio-temporelle de la demande	111
2. Des caractéristiques des TAD modulables pour en optimiser les performances environnementales	116
3. Déterminer l'influence des réseaux routiers sur les performances des TAD	124
 Chapitre 6 Un modèle pour le calcul des émissions de polluants à l'échelle du tronçon de route : GREEN-DRT.....	131

1. Choix de l'environnement de développement : Common Lisp.....	131
2. Le modèle d'émission développé	133
Chapitre 7 Une chaine de traitement pour l'évaluation des différents leviers de la performance environnementale des services de transport	149
1. Création de la donnée nécessaire pour le calcul des émissions.....	151
2. Le calcul et la cartographie des émissions	155
Partie III. Les émissions de polluants induites par les TAD : des effets de seuil.....	159
Introduction.....	161
Chapitre 8 Des simulations réalisées à des échelles variées.....	163
1. Les paramètres des simulations	163
2. Présentation des cas d'étude	164
3. Une approche statistiquement validée.....	173
Chapitre 9 Résultats.....	177
1. Influence des caractéristiques morphologiques des réseaux sur les distances parcourues.....	178
2. Variation des quantités de polluants émises selon les vitesses employées et le carburant utilisé	191
3. Réduire le nombre de véhicules et des émissions de polluants avec l'usage des TAD.....	206
Conclusion générale.....	235
Annexes.....	241
Références.....	259
Table des matières.....	267
Table de figures.....	272
Table des tableaux.....	273
Table des cartes.....	274
Table des graphiques.....	274
Table des annexes.....	275

Introduction générale

La durabilité des transports est une préoccupation majeure des pays occidentaux. En témoignent les nombreux travaux de recherche et les outils de l'aménageur s'y référant depuis les années 1990. Le Transport à la Demande (TAD) est un système de transport qui propose un usage collectif des véhicules automobiles, par opposition à l'usage des véhicules personnels (VP). Situé entre le fonctionnement des taxis et celui des transports en commun classiques, il propose un service à la fois flexible dans le temps et dans l'espace à la manière des taxis, favorisant le partage des véhicules, comme les transports en commun. Ils sont ainsi présentés comme une réponse pour une mobilité durable.

Ce travail de thèse alimente le projet de recherche « Modulobus » financé par l'ANR (depuis 2007), dont l'objectif est de développer un prototype de TAD dynamique point à point opérationnel. De nombreux travaux ont été menés autour de l'optimisation économique de la qualité de service des TAD (Garaix, 2007) ; (Chevrier, 2008), une typologie des services de TAD existant en France, selon leurs caractéristiques, a été effectuée (Castex, 2007). Par contre, leur évaluation environnementale n'a que trop rarement été étudiée. Seuls (Diana, Quadrioglio et Pronello, 2007) ont comparé les quantités de polluants émis par un système de TAD et celles émises par un système de lignes de bus classique sur un même territoire. Dans les esprits, les TAD sont souvent associés à une réduction des émissions de polluants et sont mis en place principalement dans des territoires ruraux. Pourtant, le simple regroupement effectué par les TAD suffit-il pour que la mise en place des TAD soit profitable à l'environnement ?

Les performances d'un service de TAD sont dépendantes de différentes composantes : la configuration de la demande, la flexibilité temporelle des clients pour effectuer le regroupement (fenêtre de temps), le réseau routier propre au territoire. Se pose alors la question du TAD le plus adapté (taille de la fenêtre de temps) pour quelle configuration de demande, pour quels territoire et réseau, et pour quelles quantités d'émissions de polluants. Ces études n'ont pas encore pu être faites car il n'existe aucun outil adapté à l'étude des TAD en prenant en compte la structure du réseau routier.

Dans ce contexte, le travail présenté ici vise à développer un module permettant de répondre à ces différentes questions. Nous avons mis au point le modèle GREEN-DRT à l'échelle du tronçon de route. Il permet de calculer les émissions de polluants en fonctions des différentes composantes des TAD et de les cartographier sur le réseau routier. Avec des analyses combinées de ces trois composantes, il est possible de déterminer les conditions dans lesquelles les TAD permettent une réduction globale des émissions de polluants avec une logique de comparaison avec l'usage des

véhicules personnels. GREEN-DRT constitue ainsi un outil d'aide au choix d'un système de Transports À la Demande (TAD), pouvant être utilisé par les collectivités territoriales projetant de développer un tel système.

Les TAD sont régulièrement mobilisés dans des politiques de transports durables et plus globalement, dans l'objectif d'un développement urbain durable. Dans la première partie de ce mémoire, nous les plaçons objectivement dans la problématique générale de mobilité durable. Les concepts de mobilité durable et de transport durable découlent directement du contexte actuel de développement durable. Pour avoir une approche globale de ce contexte, nous commençons par effectuer une rétrospective synthétique des questionnements formalisés à propos du développement durable. Nous proposons une distinction de l'historicité de ceux-ci selon différents domaines. Après avoir présenté le principe des TAD, nous plaçons ce système de transport dans une perspective durable. Nous identifions ainsi les analyses scientifiques manquantes à l'analyse des systèmes de TAD pour pouvoir les positionner rigoureusement dans le triptyque de la durabilité. Enfin, nous exposerons les principes d'émission de polluants par les véhicules, ainsi qu'une approche pour modéliser leur estimation (MEET et COPERT 4). Nous remarquons alors que bien que les émissions de polluants soient directement liées à des caractéristiques des réseaux routiers, ceux-ci ne sont pas considérés dans les modèles d'émission actuels.

Dans la seconde partie, nous exposons dans un premier temps les différentes composantes qui peuvent influencer sur les émissions de polluants par un système de TAD : la distribution spatio-temporelle de la demande qui conditionne les flux de déplacements ; les différents paramètres en jeu pour l'optimisation économique des services de TAD ; les caractéristiques morpho-structurelles des réseaux routiers qui peuvent influencer sur les performances environnementales des services. Dans un deuxième temps, nous présentons le détail du modèle d'émission adapté au fonctionnement des TAD, calculé à l'échelle des tronçons de route (GREEN-DRT), et les différentes étapes de la chaîne de traitements géomatique établie permettant de créer les données nécessaires au calcul des émissions de polluants avec ce modèle. L'ensemble des informations est traité au sein d'un Système de d'Information Géographique (ArcGIS) combiné à différents programmes dédiés tels que Common Lisp (gestion des échanges de fichiers et calculs des émissions), Lisp-Stat (création des fichiers de mobilité en origines et destinations) et Access (système de gestion des bases de données). La démarche développée pour les TAD peut être aménagée pour évaluer les émissions de polluants produites par les déplacements avec des véhicules personnels (VP).

Dans la troisième et dernière partie, nous exposons une synthèse des résultats obtenus grâce à différentes simulations effectuées avec GREEN-DRT. Nous comparons systématiquement les résultats de la réponse d'un service de TAD à une demande avec ceux de l'utilisation des VP pour la même demande sur des réseaux routiers aux morphologies contrastées. Nous considérons que l'usage des VP est le transport optimal en temps et il nous sert de référence. Nous pouvons ainsi effectuer des simulations permettant d'établir des lois d'efficacité des TAD selon différents paramètres (taux de regroupement, fenêtre de temps, configuration de la demande) et d'identifier des seuils à partir desquels les TAD sont plus profitables que l'usage des VP pour les mêmes déplacements par les clients en vue d'une réduction globale des émissions de polluants.

Nous concluons en complétant l'analyse actuelle de la durabilité des TAD au regard des conclusions tirées des simulations et proposons une mise en perspective des résultats avec les mesures globales de circulation actuellement développées en France.

Partie I.

**L'étude des impacts environnementaux
des transports routiers dans un contexte de
durabilité : vers des transports durables ?**

Introduction

Dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques liées à la mobilité des personnes et aux transports, le contexte actuel de développement durable nous amène à nous préoccuper des questions de mobilité durable. Ce concept qui n'est pas tout récent et qui est largement employé fait encore débat.

Le concept de développement durable a été formalisé en 1987. Différents acteurs observent alors des atteintes à l'environnement qui semblent prendre de l'ampleur, des inégalités croissantes au sein des pays et entre les pays qui s'accroissent, une croissance problématique de l'industrialisation, des questions sanitaires qui se posent en même temps que le modèle de développement productiviste montre ses premières limites (Allemand, 2007).

Le développement durable est la résultante de préoccupations qui existent depuis les années 1980. Ces questions sont réfléchies dans un premier temps dans le rapport Brundtland, en 1987. On est alors dans un contexte de Guerre froide. Les différents pays du monde sont organisés selon une partition bipolaire. Les questionnements soulevés sont planétaires et lorsque le concept est repris et affirmé en 1992 à Rio de Janeiro (Brésil), le contexte international a changé. Depuis, spécialistes et grand public ont à faire avec ce concept de durabilité dans sa complexité.

Désormais, les pays sont catégorisés selon leur stade d'industrialisation (émergents, nouveaux pays industrialisés, en développement...) qui est fortement lié au développement économique de ceux-ci. Selon le rapport Brundtland, un développement « durable » est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». La considération de la durabilité dans les questionnements de développement est en conséquence très variable selon les pays, d'autant plus que chaque pays présente des spécificités culturelles autant que d'accès aux ressources naturelles.

Nous tentons ici d'apporter de réfléchir sur l'usage de l'adjectif « durable », en nous focalisons sur la mobilité durable. Nous poursuivons par la présentation de l'approche durable spécifique d'un élément du développement territorial : la mobilité des individus. La mobilité durable sera donc présentée selon le triptyque classique de l'analyse de la durabilité (environnement-économie-société). Nous poursuivons cette analyse en réfléchissant sur les systèmes de transport durables, notamment les Transports À la Demande (TAD). Nous détaillerons ensuite les différentes approches et modèles disponibles pour évaluer l'aspect environnemental des transports au travers des quantités de polluants émis par leur mise en œuvre.

Chapitre 1 Un contexte de développement durable

Le développement durable est un concept largement employé depuis une vingtaine d'années, autant dans les sphères politiques que scientifiques. Son apparition a fait suite à des constats alarmants quant à la capacité de l'environnement à absorber les effets de la croissance industrielle. Le grand public se rend compte que les différentes pollutions peuvent avoir des impacts globaux et que toutes les populations, quel que soit leur niveau de développement, sont touchées de la même manière. Seule leur capacité à s'en protéger peut varier.

Le développement durable est un concept largement employé depuis une vingtaine d'années, dans les sphères politiques autant que scientifiques. Son apparition a fait suite à des constats alarmants quant à la capacité de l'environnement à absorber les effets de la croissance industrielle. Le grand public se rend compte que les différentes pollutions peuvent avoir des impacts globaux et que toutes les populations, quel que soit leur niveau de développement, sont touchées de la même manière. Seule leur capacité à s'en protéger peut varier.

Au cours de différentes conférences internationales, des réflexions ont été menées pour mieux expliquer les événements et ainsi agir pour en freiner les impacts. Peu à peu, on est passé d'une réflexion pour un écodéveloppement à la volonté d'un développement durable. C'est ainsi que depuis le début des années 1990, scientifiques de tous bords et politiques variés se targuent de travailler dans ce sens, si bien que dix ans plus tard, en 2001, Marcel Jollivet affirmait que « si l'on établissait un hit-parade du vocabulaire socio-politique contemporain, nul doute que l'expression "développement durable" arriverait très bien placée, si ce n'est en tête du classement, dans ces deux dernières décennies ». Nous sommes désormais en 2013 et ce constat est toujours valable. Comment se fait-il que la simple expression de « développement durable » fasse couler tant d'encre ? Pourquoi est-ce que quarante ans plus tard des éléments sont encore à discuter sur ce sujet ? Peut-être parce que cette simple expression est justement trop simple de prime abord, et que, de ce fait, elle n'inclut pas assez d'éléments conduisant à une compréhension immédiate et univoque.

S'ajoute à cela le choix d'un vocabulaire polysémique. « Durable » est un adjectif qui a plusieurs significations selon le contexte. Une définition rigoureuse de ce qui est durable pourrait être, selon le Robert, qu'est durable ce qui est « de nature à durer longtemps, [...] à ne pas se modifier, n'est pas éphémère », ou encore selon le Larousse, « de nature à durer longtemps, qui présente une certaine stabilité, une certaine résistance ». Cela renvoie à une dimension temporelle longue, à un objet pérenne. Dans un contexte de marketing, on parle de « bien durable ». Celui-ci est un bien qui n'est

pas détruit par sa simple utilisation mais qui connaît une usure sur le long terme (Bathelot, 2011). Enfin, le « durable » au sens du développement durable présuppose qu'il existe une transcendance du temps dans les actions. Plus simplement, la capacité pour un groupe d'optimiser son développement sans mettre en péril le développement des générations futures tout en ayant à accorder des enjeux différents, parfois contradictoires (Brunel, 2012 ; Veyret, 2005).

Cette polysémie n'est pas pour favoriser l'appropriation du concept par le plus grand nombre. D'autant plus qu'il échappe à l'évidence. En effet, il fait référence tant aux dimensions environnementales qu'économiques et sociales, qui sont en interaction forte. L'appropriation du « développement durable » par les politiques et le grand public en est rendue d'autant plus difficile. Ces incompréhensions ou compréhensions partielles engendrent des interprétations et/ou applications maladroites (par exemple les implications sociales des projets sont souvent négligées dans les études, et donc dans leurs mises en œuvre), voire des manipulations qui ont rapidement nui à son image (Brunel, 2012) (il a été entre autre dévoyé par les publicitaires – sous une forme raillée depuis sous le terme de « greenwashing » – masquant sous d'apparentes bonnes intentions des atteintes graves à l'environnement à long terme qu'un public non averti ne peut déceler).

Le développement durable est ainsi une belle utopie, parfois décriée. C'est le nom (discutable et discuté (Allemand, 2007 ; Brunel, 2012 ; Vivien, 2001)) donné aux solutions à des problématiques complexes, aux dimensions tant environnementales qu'économiques et sociales en interaction forte, et dont les enjeux sont généralement difficilement conciliables : ce qui serait bénéfique d'un point de vue pourrait être néfaste voire catastrophique d'un autre. À l'échelle de la planète, on peut penser ici au développement des biocarburants (carburants d'origine végétale) dès les années 2000 et à la volonté affichée d'économiser de carburants fossiles. Selon l'Institut Français du Pétrole et des Énergies Nouvelles (IFPEN), le bilan environnemental de la 1^{ère} génération de biocarburants n'est pas toujours positif : il varie selon les terres exploitées et la façon dont les matières végétales sont produites. De plus, ces biocarburants ne peuvent être produits qu'en quantité limitée, dans la mesure où ils concurrencent la production alimentaire. La consommation d'eau nécessaire à leur fabrication peut également, dans certains cas, se révéler problématique. Selon le rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation, Jean Ziegler, lors d'une réunion à l'ONU en 2007 (Centre d'actualités de l'ONU, 2007), « l'augmentation du nombre d'affamés dans le monde » déjà (trop) importante serait aggravée par la production massive de biocarburants comme l'éthanol, en diminuant les surfaces agricoles

consacrées aux cultures vivrières. Ces mises en garde ont été suivies d'un renforcement de la réglementation européenne du marché des biocarburants, notamment des critères de durabilité du biodiesel issu d'huile de palme (qui présente une réduction des émissions de gaz à effet de serre faible par rapport au diesel d'origine pétrolière). Cependant, la consommation et la production de biocarburants restent très fortement soumises aux décisions politiques et aux réglementations locales (IFPEN, 2013).

À des échelles plus locales, chaque projet d'implantation d'une industrie, d'un pôle commercial, sanitaire ou touristique, ou d'une nouvelle zone résidentielle impose un arbitrage entre les différents enjeux et leurs interactions prévisibles. Par exemple, installer une usine générant des odeurs (incinération des déchets, épuration) loin des habitations engendrera les déplacements des employés, des produits à traiter, et la destruction d'un cadre naturel, voire des risques de pollution des nappes aquifères mais préservera les riverains au quotidien. Ces arbitrages se font sous le contrôle des pouvoirs institués, mais sont bien souvent soumis à d'intenses *lobbying* plus ou moins connus des citoyens.

Il paraît alors intéressant et nécessaire de renouer avec les fondements du développement durable pour mieux comprendre ce concept tant discuté et néanmoins massivement employé. Une rétrospective, ne serait-ce que sommaire, de son apparition dans les différents discours officiels et scientifiques devrait révéler des éléments fondamentaux pour une meilleure appropriation de ses tenants et aboutissants. On remarquera rapidement que l'histoire officielle a ses racines dans des questionnements plus anciens et qu'ils varient selon les disciplines scientifiques. En outre, nous verrons que cet aspect pluridisciplinaire est essentiel dans l'approche du développement durable. Nous mettrons le doigt sur les enjeux contradictoires des trois piliers qui doivent mener vers un compromis, ou mieux encore, un consensus : société, environnement, économie. Pour clore ce chapitre sur la durabilité, au sens du développement durable, nous proposerons une analyse critique de cette notion qui est la plus fréquemment utilisée, quel que soit le type de discours ou la discipline.

1. Petite histoire du développement durable – vers une chronologie comparée

Établir un historique exhaustif du développement durable est un travail fastidieux. Il faut bien identifier ce qui relève du développement durable *stricto-sensu* des questionnements qui lui sont relatifs, ceux-ci remontant à deux millénaires en arrière. Nous ne présentons ici qu'une ébauche qui

visé à cibler des éléments-clés de compréhension de son apparition et de son interprétation qui, comme nous le verrons, varient selon les auteurs et les disciplines. En effet, la recherche d'un équilibre entre la protection de l'environnement et le développement économique et social est depuis longtemps au centre des réflexions. Les philosophes Grecs et Romains avaient déjà cette préoccupation en tête. Bien qu'oublié durant près de deux millénaires, ce concept a ré-émergé au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle sous le nom de « développement durable » (Mancebo, 2006).

Dès 1951, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) publie un premier rapport sur l'état de l'environnement dans le monde, issu de la recherche d'une réconciliation entre économie et écologie. Les années 1960 sont marquées par la prise de conscience des atteintes des activités économiques à l'environnement (déchets, fumées d'usine, pollution des cours d'eau, etc.). C'est ainsi qu'en 1970, le Club de Rome (Janine, 1972) a dénoncé les dangers d'une croissance économique et démographique fulgurante sur l'épuisement des ressources, la pollution et la surexploitation des systèmes naturels. Le développement économique et la protection de l'environnement sont alors présentés comme antinomiques. La croissance zéro n'est pas ouvertement préconisée par le rapport mais devient néanmoins l'une des idées fondatrices de l'écologie politique.

A. Une histoire officielle par les « faits »

Le concept de développement durable est officiellement créé par le rapport « *Halte à la croissance* », dit « Meadows » du nom de ses auteurs principaux, remis au Club de Rome en 1972, en préparation de la Convention des Nations Unies sur l'Environnement Humain qui se tient à Stockholm la même année. Nous venons donc aujourd'hui, en 2013, après quarante ans de construction institutionnelle du concept.

Dans les années 1970, le constat que l'action de l'homme et l'industrialisation du monde ont de réels effets sur la nature et l'environnement de par leur utilisation intensive, dans le but de toujours augmenter la croissance économique des pays, est acquis. Pour que l'Homme, la nature et la croissance économique puissent se développer dans un même temps et un même espace, et ce à différentes échelles, il devient nécessaire de repenser le modèle de développement global. C'est ainsi que les croissances démographiques consommatrices d'énergie et de matériel sont remises en cause

dans ce premier rapport (Beaud, 1994). Il présente également une certaine finitude du monde, parfois interprétée comme un « néo-malthusianisme » (Cole *et al.*, 1974). On parle alors d'« écodéveloppement ».

Cette expression est souvent assimilée à la décroissance, à la croissance zéro. On remarque dès lors un amalgame fait entre la croissance et le développement. Or, selon Joseph Shumpeter (économiste 1883-1950), la croissance est une augmentation du produit économique global. Cette notion est purement quantitative. Par contre, le développement est la combinaison des changements mentaux et sociaux d'une population qui la rendent apte à faire croître, cumulativement et durablement, son produit réel global (Perroux, 1994).

L'écodéveloppement est présenté comme une réflexion sur la croissance, proposant une « philosophie du développement » qui se base sur l'analyse des économies du tiers-monde. Selon Ignacy Sachs et son équipe (Sachs, 1980), le problème du développement est global ; cette question se pose pour les communautés tant rurales ou du tiers-monde que pour les pays industrialisés qui souffrent d'un « mal-développement ». Ils constatent alors que « le paradoxe du monde où nous vivons c'est [...] que la même distribution des richesses provoque simultanément le gaspillage sur les deux pôles de la société : les riches surconsomment et drainent de cette façon la grande majorité des ressources disponibles [...]. Les pauvres sous-consomment et [...] surutilisent les ressources auxquelles ils ont accès. ». L'écodéveloppement vise l'harmonisation des logiques écologiques et économiques qui sont souvent présentées comme incompatibles. Pourtant, « la croissance est un lieu d'amplification des problèmes environnementaux mais ce n'est pas elle qui est la cause de ces problèmes » (Vivien, 2001).

L'objectif visé par l'écodéveloppement est d'inventer une croissance respectueuse de l'environnement.

« L'écodéveloppement est un développement des populations par elles-mêmes, utilisant au mieux les ressources naturelles, s'adaptant à un environnement qu'elles transforment sans le détruire [...]. C'est le développement lui-même, tout entier, qui doit être imprégné, motivé, soutenu par la recherche d'un équilibre dynamique entre la vie et les activités collectives des groupes humains et le contexte spatio-temporel de leur implantation. »

I. Sachs – Stratégies de l'écodéveloppement (1980)

Pour Sachs, ce qui deviendra plus tard la durabilité sociale, économique, spatiale et culturelle doit être assurée par la prise en compte de trois dimensions essentielles dans le développement des sociétés :

- une **prise en charge équitable** des besoins de tous qui implique une solidarité à la fois synchronique et diachronique des populations ;

- une **prudence écologique** pour un développement en harmonie avec la nature qui préfigure le **principe de précaution** ;
- une **autonomie des décisions** et une **prise en compte des spécificités** historiques, culturelles et écologiques locales : aller vers de nouveaux « style de développement » et de nouveaux « style de vie ». I. Sachs annonçait que la mise en place des stratégies de transition pour aller dans ce sens devrait s'étaler sur 30 à 40 ans.

Au cours des années suivantes, la notion d'écodéveloppement est reprise et approfondie. En 1974, on introduit la distinction entre croissance limitée et développement que l'on appellera plus tard « durable ». ¹ En 1975, un rapport (*Que faire ? Un autre développement* - Hammarskjöld Dag Fondation) cherche à surmonter la contradiction entre nécessité du développement et menaces sur l'environnement, en préconisant « l'autre développement ». Il s'agit de satisfaire les besoins endogènes avec une prise en compte de l'environnement (Faucheux et Noël, 1990). Rapidement, on constate ce que cet « autre développement » ne se fait pas et que les pays en voie de développement adoptent les mêmes modes de consommation que les pays occidentaux. Jusqu'à la fin des années 70, la croissance exponentielle est remise en cause et l'accent est porté sur l'épuisement des ressources non-renouvelables qui apparaît alors comme unique menace environnementale globale.

Durant cette décennie, les questionnements n'ont cessé d'être élargis et les réponses approfondies lors de conférences et de traités d'échelle planétaire :

- la déclaration de Cocoyoc (octobre 1974) dresse la liste des facteurs économiques et sociaux qui entraînent une détérioration de l'environnement ;
- des conférences sur des sujets spécifiques :
 - environnement (Stockholm, 1972),
 - matières premières et développement (New York, 1974),
 - population (Bucarest, 1974),
 - alimentation (Rome, 1974),
 - droit de la mer (Caracas, 1974 - Genève, 1975),
 - industrialisation (Lima, 1975).

C'est en 1980 que l'expression « *sustainable development* » émerge pour la première fois dans un document de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), où elle est

¹ Celle-ci sera explicitée et réaffirmée 15 ans plus tard, dans le rapport Brundtland (1987).

substituée à celle d'écodéveloppement. À cette même période, des conceptions « durables » sont avancées par des naturalistes et des écologues. Le « développement soutenable », expression française transposée de l'expression anglaise, apparaît à ce même moment. Elle est popularisée avec le rapport Brundtland en 1987.

Dans le rapport Brundtland (« Notre avenir à tous » - Commission mondiale sur l'environnement et le développement – 1987, traduit en français en 1988), la croissance et le mauvais usage de la technologie ne sont plus incriminés. L'idée essentielle est que la logique économique dans son ensemble, telle qu'elle existe à cette période, concourt à détruire les équilibres vitaux de la planète. La soutenabilité ne concerne plus exclusivement les pays du tiers-monde, mais également tous les pays développés, à économie de marché. Le développement renvoie, comme à son origine en économie politique, à la dynamique des systèmes économiques. Le développement soutenable est ainsi un développement qui assure le maintien de ces systèmes sur le long, parfois le très long, terme. Contrairement à ce qui pouvait être préconisé au début des années 1970, il n'est plus question d'un arrêt de la croissance ou d'un état stationnaire généralisé. Un développement soutenable ne peut être qu'une adaptation perpétuelle du système économique aux limites que lui imposent les impératifs écologiques ; il est un « développement où évoluent système économique et biosphère de façon que la production issue du premier assure la reproduction de la totalité de ces facteurs » (Faucheux et Noël, 1990). Le rapport Brundtland propose une nouvelle façon d'aborder l'économie et l'environnement.

« L'économie mondiale et l'écologie mondiale sont désormais profondément imbriquées, et ce de diverses manières. Depuis quelque temps, nous nous soucions des effets de la croissance économique sur l'environnement. Désormais, il nous faut nous inquiéter des effets des agressions contre l'environnement [...] sur nos perspectives économiques. Nous nous sommes habitués peu à peu à la progression brutale de l'interdépendance économique entre nations. Nous devons maintenant faire de même avec l'interdépendance écologique. L'écologie et l'économie sont en effet étroitement liées - de plus en plus d'ailleurs - à l'échelle locale, régionale, nationale et mondiale : c'est un écheveau inextricable de causes et d'effets. »

Notre avenir à tous, ou Rapport Brundtland (1987, trad. 1988)

L'expression de « Développement durable » remplace celle de « Développement soutenable » lors de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED ou « Sommet de la Terre ») en 1992 à Rio de Janeiro. L'adjectif « durable » devient alors incontournable.

Pour la première fois, un large consensus émerge sur le fait que les interactions des activités économiques et de leur environnement naturel devraient être gérées pour répondre aux besoins présents sans

compromettre la capacité de développement des autres peuples ou des générations futures. L'équité intergénérationnelle face à l'accès aux biens et services environnementaux est ainsi clairement exprimée. Plus que la seule médiatisation de l'expression de « Développement durable », le Sommet de la Terre a proposé un programme d'actions concret pour l'application du développement durable au niveau local, national et international avec les Agendas 21 et autres propositions. Celles-ci ne sont juridiquement pas contraignantes, mais elles font autorité. En effet, l'Agenda 21 détermine les responsabilités qui incombent à chacun des acteurs de la société civile : les États sont particulièrement invités à se doter d'une stratégie de développement durable, et les collectivités locales, à mettre au point des Agendas 21 locaux (Brunel, 2012 ; Mancebo, 2006).

Dès lors, le développement durable devient une référence inévitable, réitérée dans toutes les conférences internationales organisées par l'ONU, quel qu'en soit le sujet : la conférence du Caire sur la population, celle de Copenhague baptisée « Sommet pour le développement social », la conférence sur les femmes organisée à Pékin ou encore la conférence d'Istanbul, Habitat II, consacrée aux établissements humains et aux villes. Jusqu'à aujourd'hui, la multiplication des conférences et des thématiques étudiées a permis de préciser un cadre d'analyse du concept de durabilité. Mais au-delà des conférences, il est intéressant de se pencher sur le contexte international dans lequel le développement durable a pris naissance. Cela permet de mieux comprendre la gouvernance du développement durable aux différentes échelles (Figure 1).

Les pays nouvellement indépendants restent tout de même sous la coupe des pays les plus industrialisés. Des décisions sont prises à l'échelle internationale pour le bien de l'environnement de ces pays (parcs nationaux en Afrique) sans souci des impacts humains. Ainsi, au Kenya en 1959, la création d'une réserve naturelle a privé des populations locales de leur territoire de chasse et donc de leurs ressources alimentaires. On retrouve des exemples similaires à Madagascar où la défense de l'écologie s'est faite aux dépens des populations locales.

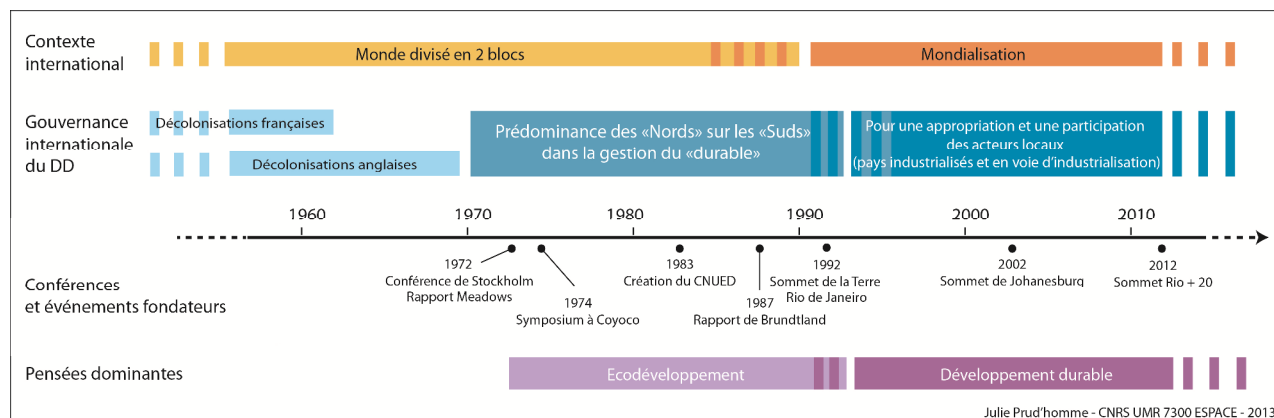
Chemin faisant, le schéma international de deux blocs décisionnels a laissé place à une certaine forme de mondialisation. Petit à petit, la gouvernance est passée du global au local. De plusieurs territoires qui formaient un État, désormais chacun est seul maître de ses choix (théoriquement). On observe tout de même la persistance d'une supervision des pays les plus industrialisés sur les projets lancés dans les pays les moins industrialisés, et ce pas toujours pour servir les intérêts de ces derniers.

Les premiers constats et réflexions initiateurs du développement durable ont d'abord été présentés dans un contexte international de Guerre froide. À cette même période, on assiste à la fin des

décolonisations françaises et anglaises. L'organisation internationale est alors définie selon deux blocs dominants, plus un ensemble constitué par le tiers-monde. Différents acteurs observent des atteintes à l'environnement qui semblent gagner de l'ampleur, des inégalités au sein des pays et entre les pays qui s'accroissent, une croissance problématique de l'industrialisation, des questions sanitaires qui se posent et le modèle de développement productiviste montre ses limites (Allemand, 2007). Les pays nouvellement indépendants restent tout de même sous la coupe des pays les plus industrialisés. Des décisions sont prises à l'échelle internationale pour le bien de l'environnement de ces pays (parcs nationaux en Afrique) sans souci des impacts humains. Ainsi, au Kenya en 1959, la création d'une réserve naturelle a privé des populations locales de leur territoire de chasse et donc de leurs ressources alimentaires. On retrouve des exemples similaires à Madagascar où la défense de l'écologie s'est faite aux dépens des populations locales.

Chemin faisant, le schéma international de deux blocs décisionnels a laissé place à une certaine forme de mondialisation. Petit à petit, la gouvernance est passée du global au local. De plusieurs territoires qui formaient un État, désormais chacun est seul maître de ses choix (théoriquement). On observe tout de même la persistance d'une supervision des pays les plus industrialisés sur les projets lancés dans les pays les moins industrialisés, et ce pas toujours pour servir les intérêts de ces derniers.

Figure 1. Chronologie comparée de l'apparition du développement durable et du contexte international



B. Des questionnements anciens qui varient selon les disciplines

Les différents événements survenus au cours de l'Histoire ont été appréhendés par les scientifiques et savants toutes disciplines confondues, avec leur interprétation particulière des faits observés. C'est ainsi que selon le spécialiste du développement durable et de la discipline dans laquelle il exerce, l'acception même du concept est particulière. Et pour cause, l'interprétation par chaque discipline du développement durable implique des postulats de départ différents et de ce fait une historicité des questionnements variée.

a. L'approche de l'économiste

Postulat : Les ressources naturelles sont limitées en quantité et si la croissance de leur utilisation continue au même rythme, elles seront rapidement épuisées.

Dans un contexte général d'expansion continue de la population et des ressources naturelles qui constituent la base matérielle nécessaire à la production et à la consommation, donc du développement, la question de la viabilité à long terme des systèmes économiques est rapidement posée. Environnement et économie entretiennent des relations qui ne sont pas à sens unique. Si, pendant longtemps, croissance économique fut synonyme de nuisances supplémentaires du fait de l'augmentation de l'industrialisation, désormais on admet qu'une augmentation du niveau de richesse de la population permet parfois de consacrer plus de moyens à la protection de l'environnement.

L'approche économique du développement durable oppose traditionnellement deux types de ressources naturelles : les ressources non renouvelables, en quantité limitée, et les ressources « renouvelables », qui par définition peuvent se régénérer. Cette approche considère également les services productifs qui regroupent extraction du minerai et des énergies fossiles, la distribution de l'eau, la pêche, l'exploitation forestière, l'agriculture, etc. qui fournissent l'ensemble du système productif des matières transformées. Ce processus de transformation engendre des déchets solides, liquides ou encore gazeux, ainsi que d'autres nuisances (bruit, vibrations, déchets, etc.). Tout cela correspond à ce que l'on désigne par « pollution » et affecte autant le bien-être des individus, les écosystèmes que la qualité de l'environnement. Avec l'extension de l'activité économique, le recours aux services productifs tirés de la nature s'est accru, ainsi que, dans l'absolu, les nuisances qui en découlent. Cependant, la relation entre l'environnement et la croissance économique n'est pas simple, car il s'agit d'une relation qui évolue au cours du temps et fait intervenir de nombreux paramètres. Selon B. Bürgenmeier (2005), il y a une interaction permanente entre pollution et

croissance économique, entre activités humaines et milieu naturel. Pour la croissance économique, le milieu naturel n'est que le facteur de production sous la forme de ressources naturelles.

Depuis le XIX^e siècle, de grands théoriciens de l'économie se sont intéressés à la question de la durabilité de l'extension de l'activité économique. J.S. Mill (philosophe, logicien, économiste, 1806-1873) prévoyait, compte tenu de la disponibilité limitée des terres cultivables et plus généralement des ressources naturelles, que l'ensemble de l'économie allait atteindre un état stationnaire où toutes les grandeurs par tête (consommation par individus, production par individu) seraient constantes. T. Malthus (économiste 1766-1834) affirmait également que la croissance importante de la population allait nécessairement se heurter à l'insuffisance de biens alimentaires dont la disponibilité ne pouvait augmenter aussi rapidement. Les progrès techniques en matière d'agriculture ont fait se relâcher les contraintes identifiées par ces penseurs.

Durant la période des trente glorieuses (1946-1975), le contexte social et économique a rapidement évolué. En effet, le taux de croissance moyen du PIB est alors important (4,9 % par an). Le pouvoir d'achat moyen des individus est donc grandement augmenté. On observe dans le même temps une amélioration des techniques agricoles et, entre autres, une amélioration du confort des ménages. Celle-ci passe par l'équipement en appareils électroménagers qui induisent une augmentation de la consommation d'énergie. Cette évolution se caractérise par une pression accrue et visible sur les ressources naturelles. On observe davantage de prélèvements mais aussi davantage de pollution. Cette situation a fait se poser à de nombreux auteurs la question de la possibilité physique d'une prolongation de cette croissance économique à long terme. Le mode de développement occidental est alors critiqué et remis en cause. En 1972, un groupe de chercheurs du MIT publie un rapport intitulé *Halte à la croissance ?*, ou rapport Meadows qui interpelle sur les risques que fait peser la croissance économique sur l'ensemble de la planète. En utilisant un modèle représentant l'ensemble des relations entre l'environnement, l'économie et la croissance de la population pour toute la planète, les auteurs de ce rapport concluaient que si rien n'était fait pour infléchir les tendances de l'époque, l'économie mondiale s'effondrerait probablement vers le milieu du XXI^e siècle. Cet effondrement résulterait soit d'un épuisement des ressources naturelles, notamment énergétiques avec la fin de l'âge du pétrole, soit des conséquences d'un niveau de pollution trop élevée. Selon les mêmes auteurs, seule une action vigoureuse visant à modifier les tendances observées pourrait permettre d'éviter une issue aussi fâcheuse.

Depuis 1992, a fleuri tout un panel de notions pour désigner des activités qui s'apparentent au « durable ». L'économie verte est apparue, voyant naître des éco-activités, faisant entrer les enjeux

environnementaux dans une économie de marché avec le concept de « croissance verte », assortie d'instruments tels que l'« éco-fiscalité ».

b. L'approche de l'écologie

L'écologie est l'un des trois piliers du développement durable. Il est construit à partir de questionnements sur les impacts environnementaux que peuvent entraîner des actions ou des politiques. En 150 ans, la discipline a évolué et s'est petit à petit centrée sur l'homme. Dans l'approche des écologues, la réflexion est passée des écosystèmes à la biosphère, d'une approche analytique qui définit les éléments constitutifs à une approche fonctionnelle (Bonhoure, 2005). Il y a également eu une translation de l'écologie à l'environnement avant de passer au développement durable. Dans le domaine de l'écologie, les questions principales portent sur la biodiversité, le changement climatique, les pollutions et les déchets.

Le terme « écologie » créé et défini par Haeckel en 1866 signifie « science de l'habitat ». Les spécialistes actuels du domaine s'accordent sur le fait que « l'écologie est l'étude des interactions entre les organismes vivants et les milieux où ils vivent, et les organismes vivants entre eux, dans des conditions naturelles ou modifiées » (Bonhoure, *op.cit.*). En 1866, l'écologie répondait à la définition de « science globale des relations des organismes avec le monde extérieur environnement » (Haeckel), dans lequel sont incluses au sens large toutes les conditions d'existence. L'écologie était alors basée sur une analyse espèces/milieu.

À partir des années 1970, l'écologie prend en compte les activités humaines. En 1974, Duvigneaud propose une approche anthropocentrée de l'écologie. En parallèle, on observe un basculement progressif vers l'« environnement » jusqu'à ce qu'une circulaire de l'éducation nationale (1977) le définissent comme « l'ensemble, à un moment donné, des aspects physiques, chimiques, biologiques et des facteurs sociaux et économiques susceptibles d'avoir un effet direct ou indirect, immédiat ou à terme sur les êtres vivants et les activités humaines ». On se dirige petit à petit vers l'ère de la « défense de l'environnement ». La place de l'homme y est parfois diabolisée. Pour Gérard Bonhoure (2005), aussi discutable que peut être cette définition, « l'introduction des paramètres sociaux et économiques l'ancre sur les futurs "piliers du développement durable" ». La place prépondérante de l'homme dans **l'écosystème** est dès lors assumée. L'écologue ne peut plus considérer les objets sur lesquels il travaille comme totalement naturels. Frontier *et al.* (2004) définissent l'écosystème comme un « système d'interaction entre les populations des différentes espèces vivant dans un même espace, et entre ces populations et le milieu physique ». Apparaissent alors les notions **d'interaction**, qui

implique que les êtres vivants subissent l'influence des facteurs dits écologiques (qu'ils soient climatiques, chimiques, hydrographique, etc.), et de **réciprocité**, qui rappelle que par leur activité, ces êtres vivants modifient continuellement leur biotope et leur milieu.

Bien que l'écologie traite des « êtres vivants » en général, on se rend rapidement compte que, parmi ces êtres vivants, l'Homme (*Homo sapiens*) joue son propre rôle au sein de ces ensembles écologiques. Bien que partie prenante au même titre que les autres espèces animales et végétales, son action peut être très particulière dans sa manière d'être et dans les effets en résultant. Ceci introduit une **anthropisation** dans les écosystèmes qui peut prendre différentes formes. En allant plus loin, on observe que depuis quatre décennies environ, la composante écologique a été restreinte au cadre de vie de l'homme, avec l'apparition du concept « d'environnement ». Celui-ci replace l'Homme au centre des préoccupations écologiques. Il désigne les différentes interactions avec la Nature, focalisées autour de l'action de l'Homme.

Le développement durable a provoqué une modification de l'approche écologiste du monde avec l'apparition de nouveaux concepts qui ont progressivement centré les analyses autour de l'Homme.

c. L'approche du sociologue

« Les enjeux sociaux du développement durable sont de satisfaire les besoins fondamentaux de tous, matériels ou immatériels, sans dépasser la capacité de charge du milieu au-delà de laquelle les dommages environnementaux deviennent irréversibles. »

Mancebo - 2006

Les enjeux liés aux questions sociales sont l'un des trois piliers du développement durable. Et pourtant, la dimension sociale n'apparaît que rarement de manière explicite dans les discours et les actions. On parle de « développement social » ou encore de « développement socialement durable ».

Le mot « social » que l'on emploie dans le langage courant est chargé d'ambiguïté. D'une certaine façon il inclut sous un unique terme la double signification de « social » et de « sociétal ». Le « social » renvoie aux composantes sectorielles du bien-être, c'est-à-dire la santé, la nutrition, l'éducation, l'emploi, des affaires sociales, etc. (Ballet, Mahieu et Dubois, 2004). Leur distribution et leurs privations soulèvent des questions de pauvreté, d'inégalité, de chômage et d'exclusion. Sa signification « sociétale » porte sur le niveau de qualité interne de la société, c'est-à-dire sur l'importance et l'intensité des interactions sociales qui existent entre les acteurs de celle-ci. Le « social » concerne donc l'ensemble des liens sociaux de toute sorte que les gens tissent entre eux et qui permet la réciprocité, le partenariat, la solidarité, la cohésion sociale et la confiance. La

destruction des liens sociaux est source de fracture et d'exclusion sociale, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur le processus de décision économique et sur la capacité des agents à agir et à créer individuellement ou collectivement (Ballet *et al.* – *op.cit.*).

Dans les années 1950 et 1960, les pays nouvellement indépendants ont mis en place des politiques de développement s'appuyant sur une planification nationale, puis d'aménagement du territoire, pour accroître leur produit intérieur brut (PIB). Ces politiques publiques ont été le plus souvent menées sans réelle concertation avec les populations concernées. Deux décennies de croissance, marquées par des taux d'investissement élevés et de nombreuses réalisations en termes d'infrastructures et d'équipements publics, notamment sanitaires et éducatifs, n'ont pas empêché le maintien d'importantes poches de pauvreté en milieu rural. De plus, cette croissance a aussi été accompagnée d'une forte montée des inégalités, de l'apparition de nouvelles formes de pauvreté en milieu urbain et d'une déstructuration de certaines pratiques ancestrales. Ces conséquences ont poussé la Banque mondiale à remettre l'accent sur la lutte contre la pauvreté (discours de Mac Namara en 1973 à Nairobi), sur la satisfaction minimale de besoins considérés comme essentiels (BIT, 1976 ; Streeten, 1979) et sur des politiques qui soient capables d'assurer une meilleure répartition sociale et régionale des fruits de la croissance (Chenery, 1974). Cette nouvelle sensibilité à la situation des populations, censées mieux bénéficier des retombées de la croissance, a amené les organismes de planification à dépasser la seule référence au revenu et à la consommation, caractéristiques du niveau de vie, pour se pencher sur la question des conditions de vie des ménages dans une vision plus qualitative du développement. (Ballet, Dubois et Mahieu, 2011)

Les années 1980 ont été marquées par la mise en œuvre des politiques d'ajustement structurel qui ont affecté la quasi-totalité des pays en développement. Ces politiques ont fait suite au boom des matières premières des années 1970. Elles ont permis aux États d'engendrer d'importantes rentrées budgétaires qui ont eu pour effet d'accroître la dépense publique en investissement (infrastructures, dépenses pour l'équipement du pays). La chute des cours qui est survenue au début des années 1980, combinée à une forte montée des taux d'intérêt, a eu pour conséquence d'étrangler des pays déjà soumis à un endettement conséquent pour maintenir le niveau d'investissement requis par leurs politiques de développement (Ballet, Dubois et Mahieu, 2011). Cette situation mettait en exergue l'interdépendance des aspects sociaux du développement des pays et de leurs conditions économiques.

Des politiques de stabilisation monétaire et d'ajustement structurel ont alors été mises en place avec l'appui des institutions financières internationales, FMI et Banque mondiale, afin de désendetter les États et de créer les conditions d'une reprise de la croissance. Elles ont privilégié le rétablissement des équilibres macro-économiques en réduisant les dépenses publiques et en relançant le secteur productif par la libéralisation des marchés. Cet ajustement s'est souvent fait au détriment des conditions de vie de certaines catégories de population, bouleversant les équilibres sociaux. Leurs conséquences négatives sur la nutrition, la santé ou l'éducation des populations ont été fortement dénoncées (Cornia, Jolly et Steward, 1987). D'autant plus que l'enchaînement de plusieurs programmes d'ajustement au cours d'une même décennie a parfois eu pour conséquence de fragiliser le tissu social, et particulièrement les classes moyennes, au point que les fondements même de la démocratie et de l'État de droit étaient affaiblis (Jarret et Mahieu, 2002). C'est dans ce contexte, qu'il a été décidé, en 1987, sous la pression du PNUD et de la Banque Africaine de Développement, d'introduire une dimension sociale au sein des politiques d'ajustement conçues par la Banque mondiale, afin de construire des mesures qui permettraient d'en atténuer les aspects les plus négatifs socialement, voire même repenser les bases de la conception des politiques d'ajustement (Dubois, 1996).

Les premières formalisations ont donc été fondées sur des observations faites à l'échelle internationale. Désormais, l'analyse des inégalités sociales des populations est réalisée sur des constats nationaux. Les observations alarmistes des années 1970 à 2000 qui portaient principalement sur les pays en développement sont aujourd'hui faites au sein même de pays dits « développés ». On constate une volonté de plus en plus marquée de limiter ces inégalités entre les populations dans les discours, mais dans les faits, il semble qu'il n'en soit rien. On peut lier cet état de fait au contexte économique actuel très bousculé qui met en exergue ces déséquilibres. Encore une fois, on perçoit le lien indéniable entre situation économique et enjeux sociaux du développement.

Les enjeux environnementaux apparaissent ainsi comme une externalité de la situation sociale et sociétale qui est elle-même une externalité de la situation économique. Il est alors question d'inégalités d'accès aux ressources naturelles liées, entre autres, à la pauvreté, éléments qu'il faut réduire pour assurer la protection des écosystèmes et la préservation des ressources naturelles pour les générations futures (Ballet, Dubois et Mahieu, 2011). De nombreux travaux ont porté sur l'impact des inégalités socio-économiques sur la dimension écologique depuis 1990. Ils montrent que la dimension sociale du développement durable importe pour appréhender la complexité des phénomènes étudiés.

d. L'approche du géographe

Différents phénomènes se déroulent à différentes échelles de manière interdépendante. Le géographe considère les phénomènes et leurs interactions dans leur globalité, de manière interscalaire, quelle que soit la discipline dont ils relèvent.

Dès le XIX^e siècle, Georges Perkins Marsh (1801-1882) dresse un bilan impitoyable de la désertification provoquée par l'exploitation intensive des forêts dans le monde méditerranéen. Il souligne que le gaspillage des ressources naturelles par les sociétés est contraire aux intérêts économiques de la nation. Il dénonce ainsi les méfaits de la civilisation industrielle. G.P. Marsh sera considéré comme l'un des premiers écologistes des États-Unis (Marsh, 1864).

Les penseurs européens ne sont pas en reste. En effet, en 1891 l'école géographique allemande organisée autour de Frédéric Ratzel dénonce une « économie de pillage ». En 1903, E. Friedrich prolonge cette analyse de manière plus optimiste puisqu'il considère que « cette situation ne manquera pas de provoquer une prise de conscience aboutissant à la mise en place de systèmes de régulation » (Veyret, 2005). Dès lors, on aperçoit les prémices d'une utilisation des ressources naturelles de manière durable. Pour E. Friedrich, il faut les améliorer et même en augmenter la quantité.

Au cours du XIX^e siècle en France, des discours émanant d'ingénieurs apparaissent et dénoncent les dangers liés à la déforestation, tenue pour une cause de la torrencialité en montagne (Surell, 1841). C'est ainsi qu'en 1882 la loi sur la Restauration des Terrains de Montagne (RTM) est mise en place. À cette époque, peu de géographes français s'intéressent aux rapports nature/société sous l'angle de la gestion des ressources et une possible dégradation de celles-ci. Élisée Reclus (1830-1905), en 1866 (Reclus, 1866), évoque les actions des sociétés sur les milieux géographiques en s'appuyant sur les travaux de G.P. Marsh. Dans *La Terre* (Reclus, 1868), il évoque des populations « devenues de véritables agents géologiques, qui ont transformé de diverses manières la surface des continents, changé l'économie des eaux courantes, modifier le climat eux-mêmes ». Par la suite, il souligne l'impatience de l'humanité de jouir de la nature sans se soucier du sort des générations futures et l'imprévoyance des habitants qui est la principale cause de l'action dévastatrice des torrents par l'abattage des forêts sur les flancs de montagne. Si Reclus dénonce les méfaits de l'homme sur la nature, il ne prône néanmoins pas pour une nature vierge et préservée de toute action humaine. Selon lui, l'intégration des hommes dans la nature peut être « excellente ou pathologique ».

En 1909, aux États-Unis, le président Roosevelt, lors d'un discours devant le Sénat américain, constate qu'avec « la croissance constante de la population et l'augmentation encore rapide de la consommation, notre peuple aura besoin de plus grandes quantités de ressources naturelles si nous, de cette génération, détruisons les ressources, nous diminuerons le niveau de vie, nous enlevons même le droit à la vie des générations futures sur ce continent ». L'école de géographie de Berkeley (États-Unis) s'empare de ce constat et s'intéresse aux relations hommes/milieu en se basant sur les travaux de Carl O. Sauer (Sauer, 1925) sur les équilibres naturels et l'harmonie écologique qu'il privilégie. L'objet central de cette géographie revient à s'intéresser aux « transformations écologiques de l'environnement sous l'action des sociétés et l'aptitude du groupe social à organiser des relations stables et de longue durée avec cet environnement ».

Au début du XX^e siècle, les différents questionnements liés à ce qui deviendra le « développement durable » sont déjà présents dans les esprits, et les préoccupations ont dépassé les cercles des scientifiques aux États-Unis. En France, des pistes ont été ébauchées, mais il faudra attendre 1970 pour voir apparaître une réflexion et une démarche géographiques sur les rapports nature/société.

À la suite d'études du gaspillage des ressources et sur l'« homme prédateur » en Allemagne et aux États-Unis, le discours des géographes français porte sur la dégradation des espaces naturels. En France, après que la géographie a été orientée massivement sur la géographie physique, on voit apparaître des questionnements environnementaux comme une mise en question de la géographie physique. À partir des années 1970, on voit ainsi apparaître de nombreux travaux sur la défense de l'environnement (George, 1971) et sur de nouvelles problématiques qui croisent faits de nature et faits de société (Tricart et Kilian, 1978). L'objet écosystème apparaît, puis le géosystème le remplace. Les recherches qui se développent dans les années 1980 s'intéressent aux « nuisances », aux risques. Elles traitent d'érosion et de dégradation accélérée des sols en relation avec l'agriculture et ses mutations (Vogt, 1962 ; Wicherek, 1993), de la variabilité climatique (Escourrou, 1990 ; Veyret et Vigneau, 2004) et de ses effets sur les sociétés, ainsi que les pollutions atmosphériques et de leurs conséquences à différentes échelles (Besancenot, 2002). Les impacts de l'anthropisation sur les dynamiques fluviales et leurs modifications sont également envisagées (Davy, 1970 ; Vivian et Edouard, 1982).

Aujourd'hui, le géographe est plus que jamais impliqué dans les démarches de développement durable. Pour certains, c'est la logique même de l'approche du développement durable qui requiert la prise en compte du territoire, autant d'un point de vue théorique que pratique (Laganier, Villalba et Zuindeau, 2002). En effet, dans une perspective théorique, l'approche en termes d'équité

intergénérationnelle se complète nécessairement d'une approche en termes d'équité intragénérationnelle. La considération des intérêts des générations futures n'a de sens que si elle va de pair avec une prise en compte de la génération présente dans la variété de ses situations. À cet égard, les niveaux respectifs de bien-être selon les territoires constituent une variable de première importance. D'un point de vue opérationnel, l'objectif de développement durable à l'échelle mondiale requiert nécessairement la contribution des territoires aux niveaux inférieurs. D'une part, quand bien même le niveau de décision se situe à l'échelon international, il n'en demeure pas moins que la concrétisation des orientations ainsi définies implique une nécessaire inscription territoriale. D'autre part, notamment avec des mouvements tels que la décentralisation, la répartition des compétences laisse une part de responsabilités significative aux différents échelons territoriaux.

Le « territorial »² est ainsi perçu comme inverse du niveau global et plus radicalement encore de la caractérisation a-spatiale qu'empruntent bon nombre de travaux sur le développement durable. Selon E. Torres (2002), les normes sont souvent élaborées à un niveau global et « a-spatial » (sans articulation avec la réalité des territoires) et de nombreux modèles mettent en avant des « normes-résultats »³ obtenues dans le cadre d'un raisonnement mobilisant une « rationalité substantielle »⁴. Toute la rationalité se réalise dans la « substance » de l'objectif à atteindre qui devient déterminant. Ainsi, la démarche utilisée pour obtenir ces normes est souvent celle d'une optimisation sous contraintes (que les fonctionnements optimisés soient écologiques ou socio-économiques). Selon lui, plusieurs modèles combinent les deux caractéristiques : globalité, absence d'inscription territoriale et rationalité substantielle maximisatrice. Par exemple, chez Barbier et Markandya (1990), un ensemble de trois « normes-objectifs » écologiques encadre la fonction d'utilité collective :

- l'utilisation des ressources naturelles renouvelables ne doit pas excéder leur taux de renouvellement ;

² Le territoire est entendu ici comme un système social, pas uniquement un espace physique mais la conjugaison de cet espace et des acteurs qui y interviennent : citoyens, représentants de la société civile, collectivités et institutions locales et régionales, représentants de l'État, entreprises, etc. Le territoire local, régional, représente une échelle pertinente pour construire des solutions intégrées, structurelles de long terme, en partenariat/collaboration étroite avec les autres échelles au niveau national et international.

³ Norme-résultat : condition(s) à remplir pour que l'exploitation d'une ressource soit optimale (d'après (Torres, 2002)).

⁴ La rationalité substantielle définit un choix rationnel, et ne pose pas la question de la rationalité de la procédure qui y conduit (Mouchot, 2003).

- les ressources épuisables doivent être extraites à un taux permettant leur remplacement par des ressources renouvelables ;
- les émissions de déchets doivent être inférieures à la capacité d'assimilation du milieu.

Ces normes n'ont de sens qu'à l'échelle planétaire et le programme de maximisation mène à un sentier optimal unique de l'économie. Un programme de développement durable local pourrait apparaître comme une tentative de transférer à l'échelon local ces normes élaborées globalement (qu'elles soient physiques, socio-éthiques ou économiques) afin qu'elles puissent être manipulées par les acteurs locaux. Bertrand Zuindeau (1996) a montré que ce transfert pose de nombreux problèmes.

- La « réduction des échelles » implique une modification des règles internes de durabilité : les normes écologiques globales perdent notamment leur sens au niveau du territoire. Elles se recomposent de façon complexe ou perdent leur cohérence en fonction de la répartition hétérogène des ressources sur les territoires, des capacités différenciées d'assimilation des milieux et des flux naturels ou de pollutions qui transitent entre ces territoires. De nouvelles normes de durabilité apparaissent au niveau local. On peut alors accroître la durabilité d'un territoire au détriment d'un territoire voisin qui ne peut que difficilement absorber les externalités de mesures prises sur le premier.
- Le développement durable spatialisé fait également apparaître une nouvelle catégorie de règles éthiques qui renvoie aux responsabilités du territoire vis-à-vis du reste du monde et réciproquement.
- Les règles globales, compliquées et abstraites, posent des difficultés pratiques d'appropriation par les acteurs locaux.

Une approche géographique, donc spatiale, devient dès lors primordiale mais le passage du global au local soulève également la problématique de la diversité des territoires. Il existe des territoires administratifs qui s'incluent et des espaces « naturels » qui peuvent recouvrir tout ou partie de différents territoires administratifs, à différentes échelles. À chaque territoire correspondent ses enjeux et ses acteurs avec leurs enjeux personnels. Il faut donc, dans tout projet de développement durable, considérer cette variété, qui recouvre parfois des oppositions. Pour cela, une approche systémique est préconisée par Christine Voiron (2005) pour optimiser l'approche opérationnelle des projets dans les territoires.

Le développement durable est ainsi devenu petit à petit, de manière plus ou moins choisie, un thème préférentiel du géographe. La territorialisation des projets de développement durable a rendu les outils et les approches du géographe incontournables pour leur bonne mise en place.

Les transports, élément clé dans le développement des territoires, sont eux aussi largement étudiés par le géographe. En effet, l'évolution des logiques d'organisation spatiale implique une augmentation des distances à parcourir. Le géographe s'intéresse aux déplacements ainsi engendrés autant pour en comprendre les dynamiques, et ainsi toujours mieux aménager les espaces, que pour optimiser les déplacements sur les territoires de manière à en réduire les coûts, les impacts environnementaux ou d'en augmenter l'accessibilité.

e. L'approche du juriste

Au cours du temps, divers événements ont provoqué une prise de conscience des différents aspects relatifs à l'équilibre entre gains socio-économiques et impacts sur l'environnement par des scientifiques des différentes disciplines. À notre connaissance, les juristes n'ont pas pris part à cette réflexion sur la question. Une fois que la dimension « durable » des choses est apparue dans les textes de lois pour leur application dans les faits, les juristes ont cependant eu la lourde tâche de définir ce concept pour pouvoir le faire appliquer de manière constante et pas seulement à l'appréciation du juge en charge du dossier.

À partir des années 1990, des lois sont promulguées pour la mise en œuvre et la promotion d'un développement durable. Les juristes ont alors à mettre en œuvre un concept encore très vaguement défini et n'ont pas la précision requise par l'application d'un texte de loi. Il est alors indispensable qu'ils définissent très clairement chaque notion relative au développement durable. Pour (Dubois-Maury, 2006), « il s'agit [...] de dépasser un stade souvent incantatoire et de traduire de développement durable dans les corpus des textes qui lui donneront la plénitude de ses effets juridiques ».

En France, ce n'est qu'à partir du milieu des années 1990 que le développement durable apparaît dans le vocabulaire législatif. Il est consacré par le titre même de la loi de 1999, dite « Loi Voynet », relative à l'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire. Durant cette décennie 1990, des références récurrentes au développement durable apparaissent dans de nombreux textes juridiques (par exemple : la loi sur l'air - 1996, la loi Solidarité et renouvellement urbain - 2000, la loi Urbanisme et habitat - 2003).

L'ambiguïté de l'expression incite à l'introduire dans un foisonnement de lois, de décrets et de circulaires traitant de domaines aussi divers que la création de l'établissement public « Réseaux ferrés de France », la chasse, la forêt, le tourisme, le commerce, les transports. Il paraît clairement que le développement durable doit désormais pénétrer toute action publique quelles que soient les échelles. On observe également une primauté des enjeux environnementaux dans les discours, d'autant plus que l'article 5 de la Charte de l'environnement sacralise le principe de précaution qui se focalise explicitement sur « les dommages graves et irréversibles pouvant affecter l'environnement » (Dubois-Maury, 2006). De par son omniprésence, le juriste a été conduit à s'interroger sur la portée pratique des notions dont les significations demeurent incertaines. Pour certains, le développement durable est un concept flou adopté en droit interne, « sans que le sens et la portée exacte de cette notion d'origine internationale ait été clairement définie » (Cans, 2003). De son côté, J. Theys (2002), se demande « si derrière une rhétorique de bons sentiments, le discours flou, de développement durable n'a pas finalement pour principale qualité de gommer les contradictions qu'il énonce », élément dont les juristes doivent s'accommoder.

À défaut d'un contenu explicite, le développement durable apparaît plus comme un ensemble d'objectifs que comme un ensemble de normes créant des applications et des droits.

2. Convergences et divergences des enjeux : aller vers un consensus et une implication forte des populations concernées

Les différentes approches présentées ci-dessus ont leur origine dans des observations communes, interprétées ensuite de manière propre à chaque discipline. Malgré ces différences de postulats et d'historicité des questionnements, toutes convergent vers ce que l'on désigne désormais comme le *développement durable* sans pour autant réussir à établir avec précision ni de façon consensuelle ce que recouvre ce concept. Le développement durable est ainsi un processus qui s'efforce de marier l'écologie, l'économie et le social. Il vise une utilisation respectueuse des ressources naturelles et des écosystèmes, capable de garantir l'efficacité économique tout en assurant des actions contre la pauvreté, les inégalités, l'exclusion. En somme, il constitue une recherche d'équité.

Le concept de développement durable reste d'autant moins évident à maîtriser que chacun se l'approprie à sa façon. Il est cependant un concept désormais incontournable qui nécessite d'être bien compris pour être utilisé de manière pertinente. Parmi les nombreuses définitions proposées au fil des ans et des réflexions, celle fournie dans le rapport Brundtland en 1987 est devenue commune et nous l'adoptons également.

« Le développement durable, c'est s'efforcer de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité de satisfaire ceux des générations futures. »

Au travers de l'intergénérationnalité, cette définition appelle à la mise en place d'un système économique pérenne et à une utilisation rationalisée des ressources naturelles qui doivent s'accompagner d'un développement social équilibré.

Depuis deux décennies, le concept de développement durable a été médiatisé et apparaît être un sujet de recherche aussi bien qu'un argument de validation de projet. Pourtant, on voit fleurir de plus en plus d'ouvrages qui décrivent l'utilisation parfois abusive de ce concept aux contours encore mal définis (Allemand, 2006 ; Brunel, 2012 ; Mancebo, 2006). En effet, alors que tout le monde s'accorde sur la définition donnée en 1987 dans le rapport Brundtland, selon les disciplines, cette définition diverge au niveau des enjeux, des paradigmes, des questionnements. Cette variété complique l'appropriation du concept par des publics avertis ce qui produit un amalgame simpliste et récurrent du développement durable avec un développement économique conçu dans le seul respect de l'environnement, et cela, dans les meilleurs des cas. En témoigne cette présentation du développement durable faite en 2005 par Émile Quinet, dans une synthèse de discussions tenues lors du « 16^e Symposium international sur la théorie et la pratique dans l'économie des transports 50 ans de recherche en économie des transports », conférence européenne des ministres des transports :

« Au sens strict, c'est un développement dans lequel la satisfaction des besoins présents n'obère pas celle du futur ; mais on l'utilise aussi souvent dans une acception plus large et plus lâche, à savoir un développement qui prend compte convenablement toutes les atteintes à l'environnement. [...] Influencer sur les transports en vue du développement durable, c'est réduire les atteintes diverses à l'occupation de l'espace et les pollutions à effet cumulatif comme les émissions de gaz à effet de serre, et notamment la consommation de pétrole ; c'est lutter contre les pollutions de l'air et des sols et le bruit ; maîtriser la congestion et l'insécurité. Tous ces objectifs impliquent une réduction des volumes de trafic et les consommations de carburant non renouvelable, une modification des émissions des véhicules en termes de polluants et de bruit, ainsi que des transferts de trafic des modes polluants vers les modes moins agressifs. »⁵

De nombreux scientifiques ont mis en garde dès le début des années 2000 contre les abus d'usage du concept de « durabilité » au sens du développement durable (Vivien, 2001). Du fait de l'aspect transdisciplinaire du concept et du manque de communication entre les scientifiques des diverses

⁵ Émile Quinet - *Portée et limites de la tarification dans la recherche du développement durable*, dans « 50 ans de recherche en économie des transports - L'expérience acquise et les grands enjeux : 50 ans de recherche en économie des transports - L'expérience acquise et les grands enjeux », 2005

disciplines, la prise en considération de ces remarques n'a pas toujours été effective. On observe le même phénomène entre les scientifiques et les politiques, d'où, aujourd'hui, des amalgames et des déviations autour du concept de durabilité au niveau des organes décisionnels. En effet, on peut observer régulièrement un tel amalgame entre transport durable et transport respectant l'environnement. Ainsi, le Grenelle Environnement de 2007 a-t-il incité les agglomérations à se doter d'un tramway, moyen de transport propre, puisque fonctionnant à l'électricité (nous ne débattons pas ici de la propreté environnementale de l'électricité en France). Reims, Montpellier et d'autres ont alors construit, ou prévu, des lignes de tramway dans les années qui ont suivi. C'est le cas à Avignon où le tramway est en projet. Lors de réunions publiques réunissant élus municipaux, ingénieurs d'étude et habitants (en 2011), sous le motif explicite d'un transport durable, le tracé proposé alors ne devait pas traverser les zones résidentielles car trop onéreux, ni même relier les deux campus universitaires ou les deux gares (gare Centre et gare TGV à 6 km de là). Il n'est pas non plus prévu de desservir l'hôpital. Par contre, les trois grandes zones commerciales étaient et restent desservies par le projet de tramway. Comment s'enorgueillir d'un tel projet de transport durable si celui-ci ne répond qu'aux enjeux commerciaux et économiques de l'agglomération, n'affichant manifestement aucun objectif sociétal ? Le tracé « définitif » du tramway en projet doit certes traverser et desservir des zones résidentielles, mais aucune liaison n'est prévue pour les gares, ni pour les campus, pour l'hôpital, pôles générateurs de flux de déplacements indéniables. Le transport annoncé « durable » ne répondra que très peu aux besoins des habitants de la ville.

A. Des représentations graphiques pas toujours opportunes

Pour tenter de rendre plus intelligible au plus grand nombre le concept de développement durable, les documents de communication sont souvent accompagnés d'une représentation graphique supposée expliciter le concept d'un point de vue sémiologique. Si la démarche est louable, l'application n'est pas forcément heureuse.

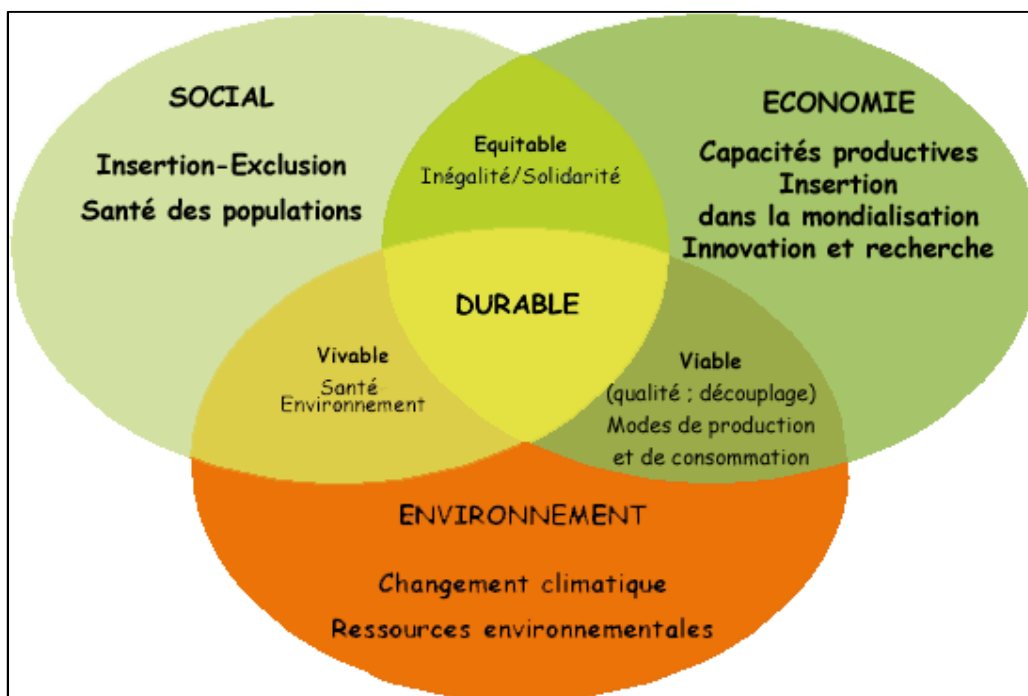
Il existe trois types de représentation à destination du grand public qui ont chacun leurs limites, mais ont le mérite de se référer aux trois piliers Économie/Société/Environnement. Le choix de la représentation est primordial si l'on poursuit un objectif pédagogique auprès de la population que l'on veut sensibiliser afin de provoquer les changements de comportements nécessaires pour atteindre les buts de la *société durable*.

Une modélisation classique du développement durable présente des sphères qui se chevauchent, chacune représentant l'un des piliers fondamentaux du développement durable (Figure 2). Celle-ci a

l'avantage de réunir les trois piliers mais l'aspect statique de la figure donne l'impression que la caractérisation d'un projet dans la durabilité est faite *a posteriori*, comme un constat terminal et n'intervient aucunement dans la construction du projet.

Figure 2. Modélisation statique du développement durable

(source : Ministère de l'écologie et du développement durable et commissariat général du Plan - www.assemblee-nationale.fr)



Da Cunha (2005) propose une forme alternative de représentation, plus explicative, plus complète du fameux triangle en détaillant les actions à mener pour s'approcher de la durabilité (Figure 3). Elle complète l'approche par les trois piliers avec les objectifs de viabilité⁶, d'efficacité⁷ et de justice environnementale⁸.

⁶Le concept de **viabilité** met l'accent sur la nécessité de maintenir à long terme les capitaux économiques tout en veillant à la reproduction des ressources naturelles. (Boillat et Pini, 2005)

⁷L'**efficacité** est un néologisme qui fait converger les notions d'efficacité économique et d'équité sociale. Il signifie que l'efficacité économique ne doit pas se faire au détriment de la justice sociale. (Boillat et Pini, 2005)

⁸La **justice environnementale** renvoie à la « distribution territoriale des avantages et des coûts environnementaux » (Boillat et Pini, 2005)

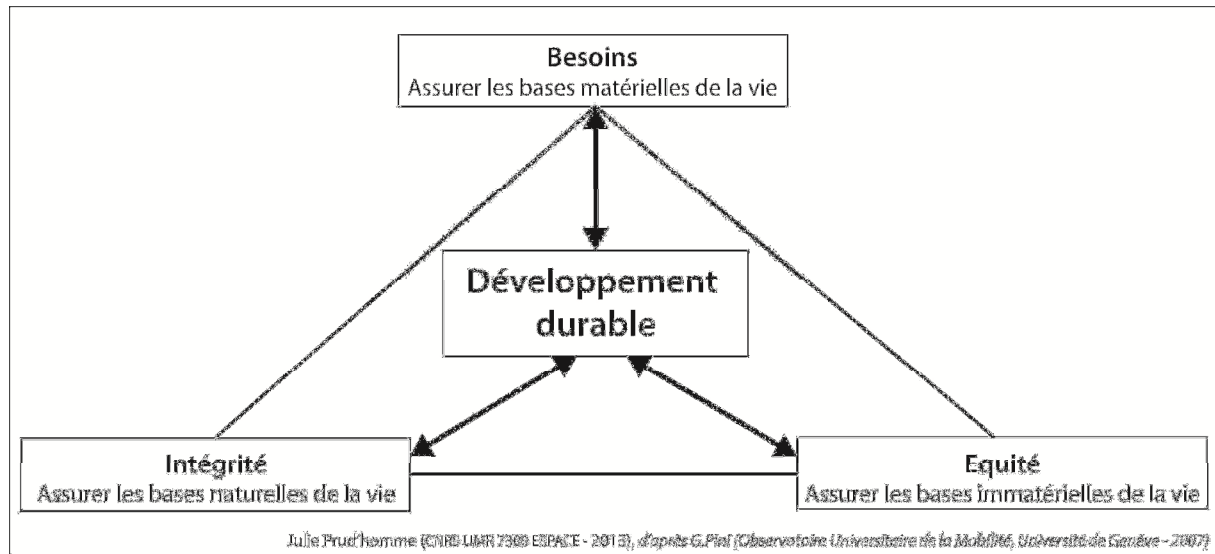
Figure 3. Le triangle du développement durable : viabilité, efficacité et justice environnementale (Boillat et Pini, 2005)



La volonté d'exhaustivité de cette figure reflète bien la complexité intrinsèque du concept qui implique un accord entre des enjeux différents. Cette figure, conçue pour un public d'initiés, est un outil précieux pour la mise en place de projets « durables » mais elle faillit en efficacité de communication vers le plus grand nombre. De plus, la position « haute » de l'aspect économique, comme dominant les deux autres n'est pas forcément judicieuse.

De son côté, Giuseppe Pini (2007) (Boillat, 2007) propose une figure relativement simple qui représente la nécessaire prise en compte des trois piliers pour la constitution d'un projet de développement durable de façon plus dynamique, sans toutefois les déconnecter les uns des autres (Figure 4). Cette dernière figure peut permettre à tout un chacun de mieux comprendre la dynamique conjointe de construction d'un projet de développement durable. Même si l'intitulé « Besoins », relatif à l'aspect économique d'un projet, est positionné de manière à surplomber les deux autres, en situation dominante, la modification des termes permet que cela ne brouille pas de trop le message. Sinon, il faudrait renverser la figure et ainsi avoir les aspects environnementaux et sociétaux surplombant à égalité la dimension économique.

Figure 4. Une modélisation de la dynamique nécessaire pour obtenir de la durabilité
(Julie Prud'homme – 2013, d'après G. Pini - 2007)



B. Une nécessaire implication de la population

Comme nous l'avons vu, le développement durable, et surtout sa mise en œuvre sur le terrain, passe inévitablement par la mise en place de politiques publiques qui se ne se révèlent pas toujours concluantes. En effet, de multiples actions visent à atteindre des objectifs chiffrés en matière de la réduction de la consommation ou de la production d'externalités polluantes. Selon le haut niveau des objectifs fixés et l'implication des parties pour les atteindre, on entend souvent dire que « les objectifs n'ont pas été atteints ». La seule décision des politiques ne suffit pas en effet pour que les choses se réalisent. Le levier pour approcher une société durable semble donc plus complexe qu'une simple décision politique. Il faut que les principaux acteurs des territoires y adhèrent et s'y sentent impliqués. Il est nécessaire de susciter l'intérêt de la part de l'acteur principal du territoire : la population (Gumuchian, 2003).

L'adhésion de la population aux mesures prises pour le soutien au développement durable est la première condition de leur succès. Les mesures décidées en haut-lieu ne pourront avoir d'effet qu'avec la volonté et l'engagement du plus grand nombre, à défaut d'un engagement unanime.

Une expérience menée en Allemagne depuis 1995 illustre bien ce propos. Dans la ville de Fribourg-en-Brisgau, connue pour être considérée comme la capitale écologique de l'Allemagne, de nouveaux quartiers à haute qualité environnementale ont été construits. La municipalité a imposé en douceur l'objectif emblématique d'un espace « zéro voiture ». Pour cela, la place accordée à la voiture est

contractée de façon drastique. Quelques rues périphériques du quartier sont accessibles à 30 km/h et elles sont bordées de quelques places de stationnement payant. Les autres rues sont dédiées en grande priorité aux piétons. Aucune place de stationnement n'est prévue pour stationner et seule la dépose rapide d'objets encombrants est autorisée. Ces mesures permettent un gain de place pour les logements et des espaces publics, mais elles imposent aux habitants du quartier un choix difficile quant à la possession d'un véhicule personnel. Il leur est proposé d'acheter à des prix volontairement dissuasifs une place de garage qui se trouve en périphérie du quartier. Des limitations strictes ont été édictées pour limiter la circulation automobile. Ces limitations sont concrétisées par l'interdiction de posséder plus d'une voiture par famille et par l'imposition de difficultés de stationnement. Pour assurer la mobilité de la population, l'usage du vélo a été favorisé, un service d'autopartage à des tarifs préférentiels a été organisé et l'intensification des services de transports en commun est prônée.

Douze ans plus tard, en 2007, Anne Hecker a présenté une première analyse de la situation. Elle mettait en évidence que les premiers résidents ont joué le jeu en renonçant à leur automobile personnelle et en adoptant la bicyclette comme moyen de déplacement. Il existe alors une réelle sensibilité écologique des premiers habitants. Mais des formes d'incivilité commencent à apparaître avec l'arrivée des derniers habitants : des véhicules sont stationnés devant les domiciles, dans des ruelles non adaptées, du fait de l'éloignement des stationnements périphériques. Et l'auteur de préciser que « [...] l'installation dans le quartier procède d'un choix, qui implique l'adhésion, en toute connaissance de cause, aux exigences qui constituent le fondement même de l'aménité des villes. Mais les implications de ces options sont plus profondes que la simple possession d'un garage éloigné. » Dans une ville où la problématique environnementale est prégnante, le désir, plus que le besoin, d'autonomie et d'indépendance fournies par la possession d'une automobile personnelle reste plus fort que tout. Malgré les aménagements effectués pour rapprocher les emplois du quartier, pour implanter les commerces au cœur du quartier, le véhicule automobile reste encore incontournable.

Cet exemple illustre bien le fait qu'un projet « durable » ne peut fonctionner que si les acteurs principaux sont impliqués dès la naissance du projet, qu'ils ont choisi d'adopter un nouveau comportement et de changer leurs habitudes. Ces mêmes changements seront pour d'autres des sacrifices auxquels il est difficile de consentir. La pérennité de tels projets paraît compromise par le renouvellement de la population sur les territoires de mise en œuvre.

Le plus grand nombre d'adhère pas (encore ?) au rêve d'une société dans laquelle riches et moins riches ont leur place tout en préservant un cadre de vie agréable pour chacun et pour les générations à venir. Si un tournant peut (ou doit ?) être initié par les politiques, il est indispensable que le message envoyé à la population soit fort mais surtout qu'il soit perçu comme équitable et pas obtenu à force de jeux de pouvoir.

C. Une appropriation du développement durable différente selon les territoires : exemple comparé du Québec et de la France

Une analyse croisée des questionnements liés au développement durable en France et au Québec permet d'identifier dans quelle mesure la dynamique d'appropriation joue sur l'engagement des gouvernements dans les problématiques concernées.

Dans *Le développement durable – Les termes du débat* (Brodhag, 2005), différents auteurs (chercheurs, politiques, philosophes, etc.) confrontent les approches et les méthodes employées au Québec et en France, territoires comparables en termes de développement.

Ils mettent en évidence une émergence du concept de développement durable dans les discours politiques très diverses entre les deux territoires. Au Québec, les questions environnementales ont émergé dans le discours politique avec l'organisation par la population de tables rondes. En France, l'appropriation des mêmes questionnements par l'État s'est faite sous la pression internationale. Les gouvernements successifs, les politiques mises en place, les travaux et réflexions menées ont la plupart du temps été à l'initiative de l'État. Selon Christian Brodhag, Directeur de recherche à l'École des mines, ancien président de la Commission française du développement durable, délégué interministériel au développement durable depuis juillet 2004, cela a posé un problème de continuité dans l'action lors du changement de gouvernement. En effet, le Conseil National du Développement Durable (CNDD) n'a pas le statut stable et installé que peut avoir le Conseil social et économique.

Dans un passé qui n'est pas si lointain (début des années 1990), l'environnement était entré dans les mœurs politiques au Québec alors qu'en France, on hésitait encore à savoir s'il fallait préférer l'Homme à la nature (Ferry, 2002). Au Québec, selon Harvey Mead, ancien sous-ministre du développement durable du Québec, les questions environnementales sont désormais intégrées dans les activités économiques et gouvernementales à différents niveaux, dépassant par là même une simple théorie.

Ces différences dans la dynamique d'appropriation du sujet par les instances gouvernementales, approche ascendante (dite « bottom-up ») au Québec, vs approche descendante (dite « top-down ») en France, ont un impact fort sur l'application du développement durable dans les faits. Laurent Mermet, professeur à l'ENGREF, souligne cette différence de la sorte : au Québec on est « fasciné par la potentialité qu'ont en eux les citoyens de faire fonctionner la politique » ; en France, « on construit une possibilité de parler, et ce faisant de se légitimer ». Et d'ajouter, rapporté par Smouts (directrice de recherche CNRS/CERI) :

« L'inculture des fonctionnaires français chargés de la concertation avec le public, leur manque de méthode en matière de procédure de médiation et d'apprentissage collectif, leur refus de savoir ce qui se fait ailleurs et de tirer parti d'expérience avancée comme celle du Québec en disent long sur la place du développement durable en France. Faute d'avoir les outils -et surtout, de vouloir s'en doter- les responsables français sont dans l'incapacité de traiter la question sociale, dimension essentielle du développement durable. »

Mermet – rapporté par M.-C. Smouts, in Smouts – 2005 – p. 11-14

Ce constat est en effet à relier à l'approche descendante pratiquée en France. Les fonctionnaires, en bout de chaîne, ont en charge d'appliquer, et/ou de faire appliquer, des décisions et des textes décidés par des instances supérieures. Il leur est demandé de faire de la « démocratie participative » et de la « concertation » sans pour autant qu'ils disposent de tous les éléments et outils nécessaires pour cela. Dans le système français, le choix des méthodes revient majoritairement aux plus hautes instances gouvernementales, ce qui crée un décalage entre actions désirées et actions effectuées. Cela joue en défaveur de l'application concrète du développement durable dans les territoires français.

D. Compromis versus consensus

Comme nous venons de la voir, il est peu concevable d'envisager la réussite du développement durable sans un engagement de la population. Les aspects sociaux des projets sont ceux qui les touchent en premier mais ce sont aussi ceux qui sont le plus souvent oubliés. Percevoir une avancée vers l'équité sociale dans un projet peut promouvoir l'engagement de la population dans la « machine durable », mais au-delà des seuls motifs des mesures envisagées, il faut faire attention au discours tenu et à la manière de présenter les choses.

On présente souvent le développement durable comme le produit d'un **compromis** entre des facteurs qui ont des enjeux contraires. Là encore, le choix de termes a son importance. Selon le Grand Robert, le compromis est un « arrangement dans lequel on se fait des concessions mutuelles. ». Un compromis se fait donc inévitablement dans la douleur. Les différentes parties

doivent renoncer à certaines de leurs prérogatives pour tomber d'accord. Le compromis est ainsi basé sur une privation de la part des acteurs, une privation qui n'est pas toujours équilibrée entre les parties. Dès lors, un *a priori* négatif est projeté sur la décision finale avec des parties considérées comme favorisées, ou négligées.

Par contre, en envisageant la prise de décision, aussi difficile qu'elle soit, comme un **consensus**, celle-ci sera faite sur la base du dialogue. En effet, par définition (Le Grand Robert, 2012) un consensus est un accord entre personnes ; un consentement. Le terme est à la mode dans le vocabulaire politique, au sens d'accord social conforme aux vœux de tous. Cet accord est basé sur la construction conjointe d'une solution à un problème, démarche dans laquelle chaque partie apporte les éléments nécessaires pour atteindre un objectif. Il n'y a dans ce contexte ni gagnant ni perdant. Dans l'idéal, toutes les parties compétentes et concernées ont participé à la construction de la proposition finale, ce qui en fait une proposition collective basée sur une cohérence des actions.

Si le résultat final peut être le même dans l'absolu, son acceptation par les différentes parties engagées, et par des personnes extérieures par la suite, ne sera pas la même. Lorsqu'on réalise que les différentes actions menées pour tendre vers un développement durable ne peuvent réussir que si la population, premier acteur de la réussite d'une action, y adhère, car elle est convaincue, on se rend compte combien l'importance de la négociation de la solution proposée est grande.

En ce sens, le principe de « géogouvernance » a été développé en France ces dernières années dans le but d'impliquer directement la population dans le montage des projets touchant à leurs territoires. Il doit, entre-autres, permettre une réappropriation des projets par la population concernée. Pour Masson *et al.* (2012), la géogouvernance est « une composante majeure du versant social du principe de développement durable, lequel repose sur une participation effective des citoyens au débat démocratique, et ce à tous les niveaux. ». Selon Dubus *et al.* (2010), « elle suppose l'organisation systématique d'un débat public impliquant les citoyens autour des décisions et des projets qui concernent le territoire et son environnement. Il est dès lors essentiel de rendre intelligible, quelle que soit l'échelle de référence, la complexité des enjeux et des dynamiques qui affectent l'organisation spatiale ».

Cette approche, encore récente, tend à être « l'outil » nécessaire pour une prise en considération plus fréquente des aspects sociaux des décisions prises sous couvert de « durabilité » et leur appropriation par les acteurs concernés. Cela implique directement la population, ce qui peut jouer en faveur d'une

prise de conscience et d'une modification qui, ne serait-ce qu'à la marge des comportements, paraît indispensable pour envisager le développement d'une société « durable ».

En définitive, toute décision politique « durable » se doit d'être accompagnée de « volontés » d'actions réelles de la part du public visé et de mesures concrètes pour les accompagner. Il est nécessaire pour cela que les mentalités et les comportements de la population changent. Cela ne pourra se faire sans une forte implication de tous. Les pouvoirs publics ont ainsi le devoir de convaincre le plus grand nombre s'ils veulent que la population adhère au projet et s'engagent concrètement dans cette voie.

Conclusion

En résumé, le développement durable a pris naissance dans le contexte d'une organisation internationale fortement structurée, mais a commencé à être appliqué dans un monde disloqué où chaque pays peut parler d'une voix. Ce changement de contexte n'a probablement pas aidé à une appropriation rigoureuse du concept par les différentes instances nationales, ce qui a contribué à entretenir un flou autour de son expression et de sa perception. La diversité des approches disciplinaires du concept n'a pas permis de présenter une vision univoque des questionnements au grand public. À cela s'ajoute un choix pour le moins hasardeux d'un vocabulaire imprécis et d'une représentation graphique pas nécessairement efficace et peu représentative du concept : on comprend ainsi que, vingt ans plus tard, le sujet soit toujours ouvert et qu'il soit toujours autant débattu. La dernière conférence en date, « Rio + 20 - L'avenir que nous voulons » (20-22 juin 2012), qui devait faire le bilan des avancées à l'échelle mondiale en matière de développement durable et relancer des projets pour s'approcher encore d'avantage d'une société mondiale durable, a été proche du fiasco. Il a été marqué par le refus massif des acteurs concernés d'adhérer au projet international, refus exprimé par l'adoption d'un texte particulièrement décevant en termes d'ambitions et d'engagements en faveur d'actions immédiates. En cette période de crise économique, les problématiques environnementales et sociales sont loin d'être prioritaires. Nous retrouvons ainsi ce que l'on peut observer à l'échelle d'une commune, d'un département, d'une région, d'un État. Cela illustre bien le constat sur lequel tout le monde s'accorde : le développement durable exige l'adhésion de tous au projet.

Quoi qu'il en soit, le concept de durabilité est la grille actuelle d'analyse du monde qui nous entoure. Qu'il s'agisse de tourisme, de logement, ou même de santé, la considération des trois piliers fondamentaux est de mise. Pour ce qui nous concerne dans ce travail, nous allons présenter et détailler le concept de « mobilité durable » qui est apparu dans les discours accompagné de l'apparition de la « ville durable ».

Chapitre 2 La mobilité durable

Avec la diffusion du concept de développement durable, celui de ville durable est apparu. De la même manière que développement de la ville et mobilités sont intimement liées, la mobilité durable est un aspect fondamental de la ville durable. Après un questionnement sur la qualité « durable » des villes, nous présentons les différents aspects de la mobilité durable liée à l'existence de transports durables.

1. Vers une ville durable

François Moriconi-Ebrard présentait en 1993 la ville « tour à tour comme un "bienfait", parce qu'elle facilite l'interaction, la diffusion du progrès, l'innovation, ou au contraire sous un jour catastrophique, car elle est aussi parfois le refuge de millions d'exclus qu'elle ne parvient pas toujours à assimiler, [elle] est fort logiquement l'un des thèmes favoris des sciences humaines et sociales. » (Moriconi-Ebrard, 1993)

A. Définitions de la ville

Selon François Moriconi-Ebrard (2000), les grandes villes peuvent être appréhendées à trois niveaux, niveaux qui ne sont pas indépendants les uns des autres.

- La ville politique, « la ville » tout simplement, est une catégorie de gens. Ces gens sont réunis dans une unité administrative et territoriale, dotée d'un statut. À son commencement, ses habitants se sont libérés de l'emprise d'un pouvoir territorial par une charte. Elle était souvent entourée de murs.
- « L'agglomération » est un milieu géographique. Si dans le paysage les limites administratives sont invisibles, celles de l'agglomération sont mieux identifiables. Marquées par une rupture morphologique dans le front de construction, elles se voient. L'agglomération est densément peuplée et occupée, l'homme doit apprendre à s'organiser en fonction de cette contrainte. C'est une étendue de territoire dont les formes n'ont souvent pas de lien avec les limites administratives.
- « L'aire métropolisée » (ou aire urbaine, ou zone métropolitaine...) est un système socio-économique fait de mouvements et dont on évalue les dimensions à partir de faits économiques ou sociaux : navettes domicile-travail, fonctions, niveaux de service. Ses limites sont invisibles dans l'espace car l'aire métropolisée s'appréhende par les réseaux. Or, par définition, les réseaux n'ont pas de limites territoriales.

On a ainsi trois définitions : la ville-fait politique, la ville-fait géographique et la ville-fait économique. Une « ville » est parfois plus grande qu'une « agglomération », et certaines « agglomérations » englobent à l'inverse plusieurs « villes ». Une « aire métropolisée » peut s'étendre bien au-delà des limites morphologiques d'une « agglomération », ou au contraire n'en représenter qu'une partie.

Cette approche peut être complétée par une approche plus fonctionnelle de la ville telle que Da Cunha propose dans « Enjeux du développement urbain durable ». Selon lui, la ville est un « produit social, lieu d'accumulation économique et symbolique, [...] un territoire incertain et toujours inachevé. Elle ne produit ni la matière ni l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins et les demandes de la population ». (Boillat et Pini, 2005)

D'un point de vue écosystémique, la ville est un système ouvert dans lequel différents facteurs interagissent : facteurs culturels, économiques, politiques, biologiques ou encore physiques. Les théories écologiques appliquées à la ville permettent ainsi de comprendre les logiques de la mise en ordre des objets urbains par les hommes, et la théorie des systèmes permet de concevoir la ville comme un système ouvert dans un système de villes. Les éléments tels que l'énergie, les ressources naturelles et la production de déchets, sont envisagés comme des flux dans une chaîne plus large de relations. Selon Da Cunha, c'est dans cette perspective que doivent être étudiés les pollutions qu'engendre la ville, les matériaux qu'elle utilise, l'énergie qu'elle consomme, son empiètement sur l'espace agricole. En « gaspillant du sol » et en encourageant l'utilisation des transports motorisés, l'urbanisation intensive rend la ville moins efficace (Berezowska-Azzag, 2008 ; Boillat et Pini, 2005). L'utilisation des ressources naturelles est alors accrue et la qualité du cadre de vie diminue avec la nécessaire augmentation des infrastructures et du nombre de véhicules sur les routes.

B. La ville, un objet durable ?

Depuis 1970, l'augmentation de la population urbaine en France couplée à l'idéal de la maison individuelle avec jardin a provoqué un étalement urbain exacerbé. Selon l'INSEE, en France métropolitaine en 2010, les villes occupent 22 % du territoire et abritent 77,5 % de la population, soit une augmentation de près de 4,7 % de la population urbaine depuis 1999 (Clanché et Rascol, 2011). Cette augmentation de la population urbaine a été mécaniquement accompagnée par un besoin en espace urbanisé important. En effet, toujours selon l'INSEE, entre 2000 et 2010 la superficie de l'espace urbain en métropole a progressé de 19 %, soit près de 15 points de progression supplémentaires par rapport à l'augmentation de la population urbaine. Cela s'est traduit par une

expansion géographique des aires urbaines du fait de l'implantation en périphérie, au détriment de larges zones principalement agricoles, de types d'habitat peu denses (banlieues pavillonnaires, maisons individuelles) (Agence européenne pour l'environnement, 2012). Cette dilatation de l'espace urbain se traduit par une diminution de la densité des zones urbanisées du fait d'une extension géographique plus rapide que la croissance démographique. En d'autres termes, les villes croissent en surface et le territoire s'artificialise à un rythme beaucoup plus important que ne l'imposerait le seul facteur démographique.

L'augmentation de la surface des espaces urbanisés et la diminution de la densité de population, liée à la forme d'habitat développé, entraînent une augmentation des distances à parcourir au quotidien. Cette dispersion de la population sur le territoire favorise l'usage de l'automobile personnelle (Dupuy, 1999) avec les inconvénients que l'on lui connaît (embouteillages, pollution, nuisances sonores, etc.). Ralph Henson et Stéphane Essex, en 2003, faisaient très justement remarquer que « le transport est un élément capital du fonctionnement des zones urbaines » et que selon la densité des habitations sur les espaces, le mode de transport majoritaire varie. L'existence de villes à faible densité ne peut être « possible que si une proportion importante de la population dispose d'une automobile » Au contraire, les villes plus compactes « supposent qu'une part importante de déplacement s'effectue sans automobile ».

L'étalement urbain rend ainsi la mobilité des personnes indispensable. En perpétuelle croissance, la ville contraint à des déplacements plus nombreux, plus longs et majoritairement effectués grâce à l'usage des transports motorisés personnels, ce qui provoque mécaniquement une augmentation de la consommation énergétique et donc de la pollution atmosphérique (Da Cunha *et al.*, 2005). En accompagnement de l'étalement urbain, on assiste à une fragmentation et une division fonctionnelle de l'espace (Boillat et Pini, 2005), ce qui ne fait qu'augmenter les distances et la dépendance à l'automobile.

Néanmoins, la ville est, par essence-même, le lieu favorisant les échanges et les interactions entre les individus, le progrès, la culture, le développement. La ville est également, par construction, orientée vers une économie des surfaces et des moyens ; elle peut donc, également, participer de l'effort de protection de l'environnement naturel. En conséquence, la question, au fond, n'est pas d'être favorable ou non à la ville, l'urbanisation, l'artificialisation des espaces (Wiel, 2010). Il s'agit en réalité de déterminer quelles sont les formes urbaines les plus efficaces et les plus souhaitables pour répondre à cette demande, et quels rythmes d'artificialisation et d'étalement urbain peuvent être

acceptés. Pour le Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2012), la ville durable devra être une ville « souhaitable, désirable et soutenable. »

Il n'en reste pas moins qu'il est nécessaire de trouver des solutions aux questions de mobilité des personnes de manière à minimiser les impacts néfastes sur l'environnement. Pour Marc Wiel (2002), « il faut penser ensemble mobilité et agencement urbain. »

C. La ville comme levier d'action pour une société durable

En 2002, Jacques Theys écrivait que « c'est essentiellement à l'échelle des territoires que les problèmes de développement durable sont perçus et c'est sans doute également là qu'ils peuvent trouver des solutions à la fois équitables et démocratiques. » À le lire, l'« hétérogénéité géographique – particulièrement marquée en France – est une première raison qui peut justifier une forte territorialisation des stratégies de développement durable. »

Jacques Theys considère aussi qu'une intervention à l'échelle territoriale a probablement plus de chance d'être efficace qu'au niveau global, dans la mesure où les « responsabilités sont plus faciles à établir, les actions plus commodes à contrôler, et les interdépendances entre acteurs plus aisées à prendre en compte ». Le niveau local apparaît alors comme le seul à pouvoir garantir le minimum de cette transversalité qui est au cœur de la notion de « développement durable ». Une des particularités majeures des stratégies locales de développement durable – notamment les « Agendas 21 » – est de vouloir s'appuyer sur des procédures de concertation, avec les groupes d'intérêt, les associations, les entreprises ou même l'ensemble de la population. On peut naturellement s'interroger sur la portée réelle de ces expériences, mais il est clair qu'elles donnent aux politiques locales de développement durable une légitimation démocratique que n'ont pas nécessairement les approches nationales ou internationales. Or, comme nous l'avons déjà expliqué, rien de concret ne se fera dans ce domaine sans une implication et un appui sans équivoque du public. Pour Jacques Theys, les projets de développement durable peuvent tirer leur légitimité de leur capacité à répondre à des attentes locales immédiates, ou à anticiper des crises spécifiques à chaque territoire.

La ville deviendrait alors un levier d'action mobilisable la durabilité. En maîtrisant la consommation des sols, en freinant l'étalement exacerbé des villes, on peut déjà agir pour une économie des ressources énergétiques et une réduction des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre (Boillat et Pini, 2005).

2. Pour une mobilité durable

L'approche de Roger Brunet, avec le concept d'« espace géographique », nous offre une lecture autre de la problématique du développement des villes et des mobilités qui s'ensuivent (Brunet et Dollfus, 1990). Elle permet de mettre aisément en perspective les préoccupations actuelles de mobilité durable. L'« espace géographique » est pour lui une « œuvre humaine par essence, mode même d'existence des sociétés ». L'analyse conduite au contact de ce concept est que l'espace, à un instant T, est l'héritage de constructions passées, plus ou moins lointaines. Ainsi, la forme et l'organisation des villes d'aujourd'hui sont le résultat de logiques passées, résultantes de choix « humains ». L'étalement urbain observable aujourd'hui résulte ainsi de constructions massives de lotissement en périphérie des villes pour répondre à la demande de maisons individuelles avec jardin depuis les années 1970. Cet héritage va à l'encontre des objectifs de durabilité de la ville actuelle. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, cette forme implique une dépendance forte à l'automobile, provoquant des déplacements nécessairement longs pour relier les différents lieux de vie au lieu d'habitation. La faible densité rend la mise en place de transport public classique (exemple de lignes fixes de bus) économiquement non rentable. Il convient donc de s'accommoder d'un héritage qui s'impose à nous et de penser dans le même temps à une organisation plus adaptée des zones urbaines.

Il semble désormais nécessaire de considérer deux temporalités différentes dans l'action en faveur de la mobilité, et donc la ville, durable :

- le temps immédiat (**maintenant**) : penser les pratiques de mobilité dans l'espace hérité de manière à les rendre fidèles aux nouveaux objectifs de durabilité ;
- le temps long (**à partir de maintenant**) : penser l'aménagement des villes pour favoriser la mobilité durable.

Dans le contexte d'objectif de villes durables, les pratiques de mobilités occupent alors une place charnière. Selon le concept d'« espace géographique », les pratiques de mobilité sont à la fois résultantes de la forme héritée des villes et créatrices de cet espace. En effet, la localisation des différents services dans la ville dépend de la capacité de mobilité des individus. De plus, certains aspects de la mobilité des individus ne découlent pas systématiquement uniquement de la forme des villes. Pour la pratique de trajets courts, le choix du mode de déplacement incombe en grande majorité à l'individu. C'est lui qui décide à un moment de parcourir les 800 mètres qui séparent son domicile de la boulangerie en voiture et non à pied ou à vélo. La forme et l'organisation des villes ne

conditionnent donc pas tous les comportements de mobilité, mais ils y contribuent (Batty, 2004 ; Foltête, 2007 ; Hillier et Hanson, 1988).

Comme nous l'avons déjà dit, depuis 1992, on parle de projets et de politiques de mobilité durable. En effet, durant la période des trente glorieuses, la réponse aux problèmes de congestion était d'accroître la capacité du système routier et autoroutier pour ainsi augmenter la rapidité des flux. L'objectif, dans les années 1980, était d'obtenir une gestion efficace des flux de circulation, les impacts environnementaux étant pris en compte mais ne devaient pas compromettre les objectifs économiques. C'est en 1992 que « Le livre vert de la Commission européenne sur l'impact du transport sur l'environnement » a promu politiquement le concept de « mobilité durable ».

A. Ce que recouvre le concept de mobilité durable

Il est dès à présent nécessaire de différencier « mobilité durable » et « transport durable ». La mobilité durable considère les comportements et les pratiques de déplacement des individus alors que le transport durable est un moyen technique de parvenir à ces comportements et pratiques. Apparue officiellement en 1991 dans le cadre de la CEMT (Conférence Européenne des Ministres Transport), cette notion de « transport durable » revêt une acception proche de celle du rapport Brundtland, en reprenant notamment les trois piliers traditionnels du développement durable (Meunier et Zeroual, 2006) : le transport durable doit « contribuer à la prospérité économique, au bien-être social, et ce sans nuire à l'environnement et à la santé de l'homme » (CEMT, 1991). Le Centre canadien pour un transport durable précise un peu plus la notion de transport durable en 1998 (CEMT, 1998) :

« [Le transport durable doit] permettre de répondre aux besoins en transport des personnes et des collectivités et ce en toute sécurité et de façon à respecter la santé des humains et des écosystèmes, ainsi qu'avec équité parmi les générations et entre celles-ci [. Il doit] être abordable et efficace, offrir le choix du mode de transport et appuyer une économie dynamique ; restreindre les émissions et les déchets afin de respecter la capacité de la planète d'absorber ceux-ci, réduire au minimum la consommation des ressources non renouvelables, réutiliser et recycler les composants employés et réduire au minimum l'utilisation du sol et la production de bruit ».

À partir de 1992, le transport durable est pensé et analysé en termes de progrès des mesures techniques alors que la mobilité durable vise à introduire des dimensions éthiques et sociales aux solutions proposées (Bourdages et Champagne, 2012). Le concept de mobilité durable inclut donc celui de transport durable mais cela n'est pas réciproque.

Tout comme le développement durable, le concept de mobilité durable est un concept flou. Pour certains auteurs (Bourdages et Champagne, 2012), cet état de fait est très favorable car cela force les différents acteurs au débat et à la discussion lors de la constitution des projets. Il est présenté comme un moyen de préservation des bénéfices sociaux et économiques associés à la mobilité, qui parallèlement réduit les impacts économiques, sociaux et environnementaux liés au transport (Köhler *et al.*, 2009). Il est également décrit comme un moyen de réduire les volumes de mouvements motorisés par d'autres alternatives, ce qui signifie l'invention de moyens pour diminuer à terme le volume de mouvements actuels des biens et des individus portés principalement par les modes de transports motorisés individuels (Paterson, 2007). Il ne s'agit donc plus simplement d'élaborer des moyens techniques afin de favoriser des transferts modaux, mais bien de repenser plus largement les manières d'intervenir sur l'organisation et le développement de l'espace, afin de réduire la dépendance à la mobilité motorisée. Au-delà d'une action directe sur l'offre de transport, on cherche à rétablir la capacité d'agir, d'une part, sur l'urbanisme et la maîtrise du développement des milieux urbains, d'autre part, sur un changement culturel plus profond à l'égard de la mobilité des personnes.

De plus, étant directement liée au concept de développement durable, la mobilité durable repose sur les mêmes trois piliers fondamentaux. La mobilité peut être alors qualifiée de durable lorsque sa réalisation respecte l'intégrité de l'environnement, permet d'assurer les besoins matériels de la vie et garantit l'équité entre les individus (Boillat et Pini, 2005). Cela requiert des systèmes de transports durables qu'ils respectent les limites écologiques, qu'ils assurent l'efficacité des déplacements du point de vue économique ainsi que l'équité sociale. De la même manière que le développement durable, la mobilité durable doit réussir à concilier des enjeux contradictoires et converger vers un objectif réel d'orientation de la population vers un comportement plus responsable (dans le sens du développement durable).

Les pratiques actuelles de mobilité semblent donc à revoir : la majorité des déplacements sont effectués en « voiture-solo » (une voiture = une personne, le conducteur), des distances importantes sont parcourues chaque jour pour relier les différents lieux de vie. Les discours les plus courants avancent trois types de réponses à cette problématique : **moins** se déplacer, se déplacer **autrement**, **mieux** se déplacer (ADEME, 2012).

« **Moins se déplacer** » implique deux dimensions d'action :

- une diminution de la récurrence des déplacements ;
- une diminution des distances parcourues pour chaque déplacement.

On aspire alors à ce que chacun diminue ses déplacements en les organisant pour regrouper les objectifs lors de quelques déplacements plutôt que de prévoir un déplacement pour chaque objectif, tout en minimisant les distances parcourues. Cela implique qu'il y ait une distribution optimale des équipements et des lieux de loisirs sur le territoire par rapport aux lieux d'habitation et de travail, leurs localisations conditionnant majoritairement le choix des autres. En effet, ces trajets constituent la mobilité contrainte et sont considérés comme structurant l'ensemble de la mobilité, car ils représentent 27 % des motifs de se déplacer, 41 % des distances parcourues, et doivent être réalisés dans des plages horaires contraintes (Madre *et al.*, 2010). Le développement de nouvelles technologies de communication permettent déjà de réduire les distances, par le télétravail et la visio-conférence pour éviter des situations ubuesques telles que celle d'un déplacement de 3 heures aller et 3 heures retour pour une réunion de seulement 2 heures.

« **Se déplacer autrement** » suppose que chacun réfléchisse au mode transport qu'il va utiliser. En effet, si l'usage de l'automobile personnelle est parfois incontournable (pas de solution en transports en commun disponible pour effectuer un déplacement par exemple), dans de nombreux cas il est possible d'effectuer le déplacement en utilisant un mode de déplacement dit « doux », ayant peu ou prou d'externalités négatives.

« **Mieux se déplacer** » désigne la possibilité de continuer d'utiliser son automobile personnelle en la partageant, c'est-à-dire sans rester sur un mode « voiture-solo ». Il s'agit de favoriser les actions de covoiturage et d'autopartage.

Il convient alors d'agir sur les comportements, les modes de transport et l'organisation de transports collectifs plutôt qu'individuels. Une réponse globale est apportée par l'innovation technologique appliquée aux automobiles en les rendant moins « énergivores » et en minimisant les rejets de CO₂ par les moteurs⁹, mais la réponse la plus pérenne y tiendra de la modification profonde des habitudes des personnes quant à leur mobilité.

Comme nous l'avons mis en évidence précédemment, ces objectifs ne peuvent être atteints qu'avec l'implication systématique de la population. En effet, ils exigent que chacun modifie ses habitudes de mobilité et adapte son comportement à de nouvelles contraintes. Pour inciter et aider la population à

⁹ Nous verrons par la suite que la considération du seul CO₂, gaz à effet de serre – polluant global, ne suffit pas et qu'il est également pertinent de s'intéresser aux émissions de gaz provoquant une pollution atmosphérique – polluants locaux - qui ont un impact direct sur la santé publique.

effectuer cette évolution vers une réduction de l'usage des transports individuels motorisés, Boillat et Pini (2005) proposent deux stratégies d'action :

- **agir sur l'offre**, c'est-à-dire changer les comportements en modifiant l'offre de transports au travers d'investissements en infrastructures (routes, transports publics, modes doux), de mesures financières (péages, tarification du stationnement, etc.) ou encore restreindre l'offre (politiques de stationnement, etc.) ;
- **agir sur la demande**, modifier la demande de transports avec des mesures d'incitation, de promotion et de sensibilisation. Des politiques d'aménagement et d'organisation spatiale des territoires doivent être prises pour favoriser la densification des espaces urbains, la mixité fonctionnelle de l'espace, et cela en prenant soin de coordonner urbanisation et transports publics. Des mesures d'aménagement du temps de travail peuvent aussi permettre une orientation des pratiques vers les transports publics.

De la même manière que pour la mise en place de mesures de « développement durable », on remarque que les mesures politiques ont une place prépondérante pour inciter à une modification substantielle des comportements de la part de la population. Ceci d'autant plus que pour les questions de mobilité, les individus avec leurs habitudes et leurs comportements, entrent directement en jeu. Leur participation est indispensable, mais il n'est jamais évident de demander à chacun de modifier ses pratiques car cela peut être très mal admis. Les politiques publiques à mettre en place doivent efficacement aider, voire contraindre en douceur, ce qui peut être vécu comme un réel bouleversement de mode de vie.

Pour obtenir ces changements, les transports sont des moyens à prendre en compte dans le cadre de politiques publiques. On agit ainsi sur l'offre, avec pour objectif d'amener des individus à délaisser leur véhicule personnel pour un, ou plusieurs, autre(s) mode(s).

B. Systèmes de transports et durabilité

« Il va de soi que l'objectif de la mobilité durable n'est ni simple, ni facilement réalisable : croissance persistante de la demande de transport, faible diminution de la part des transports effectués par voie routière, assez lente pénétration des technologies et pratiques avancées, autant de signes généraux qui viennent corroborer cette constatation, sans compter que le secteur des transports est toujours à l'origine de plusieurs types de très graves dégradations de l'environnement, qu'il s'agisse de la modification du climat à l'échelle de la planète ou de la santé humaine à l'échelon local. »

Gudmundsson - 2003

Dans une démarche de mobilité durable, l'action sur les systèmes de transport doit se faire de manière à respecter les problématiques soulevées selon les différents enjeux. Pour bien mettre en évidence les objectifs à remplir par un système de transport dit durable, nous passons en revue les approches de chaque pilier de la durabilité et ferons apparaître les questionnements qui leurs sont communs.

a. Approches économiques pour des systèmes de transports durables

Du point de vue économique, les transports doivent être tels qu'ils favorisent l'efficacité des mobilités. Pour cela, les enjeux économiques du transport durable sont notamment perceptibles à trois niveaux d'analyse et d'action différents que nous détaillons par la suite. Un premier est celui du système de transport en lui-même, avec l'internalisation des externalités des transports sous la forme de contreparties pécuniaires. Un second concerne les pratiques de mobilité des individus avec une recherche du découplage de la croissance économique et de l'augmentation des mobilités. Le troisième niveau d'action, le dernier traité dans ce travail, tente de concilier la recherche d'efficacité et d'équité spatiales dans les politiques de transport.

- Internalisation des externalités des transports

Il est avéré que les transports ont des effets généralement négatifs sur l'environnement. Le concept de transport durable tend à minimiser ces externalités négatives qui ont des impacts sur l'environnement local et global. L'internalisation des externalités consiste à affecter un coût à chaque externalité et de l'imputer à la personne morale qui en est responsable. Cela ne concerne que des externalités qui n'affectent pas directement le responsable, car on considère qu'il « souffre » autant que les autres de ses actes. Prenons comme exemple le bruit provoqué par la circulation d'une automobile. Le responsable de cette externalité, le conducteur du véhicule, est bien moins impacté que les individus se trouvant à l'extérieur, à proximité du véhicule. Ils peuvent être de simples passants, des personnes habitant en bordure de route, etc. La contrepartie pécuniaire de cette

externalité doit être calculée au plus juste (tous les moteurs automobiles n'engendrent pas le même volume sonore) et doit être proportionnelle aux impacts vécus par chaque victime (élément difficilement quantifiable). Cette contrepartie ne peut être donc pas être versée directement aux individus impactés. De ce fait, elle revient à la société dans son ensemble au travers de différentes taxes. Par exemple, ce principe est déjà en application pour favoriser et valoriser les véhicules les moins émetteurs de CO₂ avec le système de bonus/malus écologique mis en place par le gouvernement français en 2012 sous forme de prime ou de pénalité financière pour l'acquéreur (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2012).

Cette approche en faveur des transports durables passe par la monétarisation des externalités. Elle peut aller jusqu'à l'évaluation économique de la blessure d'individus suite à un accident de la route, selon leur gravité. Pour rappel, la durabilité doit être intra- et intergénérationnelle. Le transport durable ne doit donc pas mettre en péril la vie d'un individu et si par malheur cela survenait, la vie perdue d'un enfant coûtera plus cher que celle d'un adulte au responsable de l'accident (Boiteux, 2001).

Selon cette approche, le transport le plus durable sera celui qui coûte le moins cher au kilomètre, en comparaison à un autre transport de la même classe et en faisant abstraction des éventuelles subventions, car il sera moins taxé du fait qu'il aura moins d'externalités, en quantité et en gravité des impacts.

- Découplage mobilité/croissance économique

Pour Liana Giorgi (2003), le terme « mobilité durable » désigne grosso-modo tout ce qui est en jeu dans les tentatives de rééquilibrage des coûts et des avantages dans le secteur des transports. Il marque une rupture avec la démarche traditionnelle de la planification des transports qui concevait le transport comme une demande dérivée et comme une infrastructure d'appui pour la croissance économique, au profit d'une démarche décisionnelle éclairée par les faits et l'évaluation des risques et qui n'ignore pas les écueils d'une expansion sans frein. En effet, un des aspects préconisés pour une mobilité durable par la Commission européenne est le découplage entre croissance économique et croissance de la demande de transport. Le découplage est défini par l'OCDE comme la notion qui traduit les liens entre « ce qui est mauvais à titre environnemental » et « ce qui est bon au niveau économique ». Le découplage compare donc les pressions sur l'environnement aux évolutions des variables économiques qui génèrent ces pressions.

La Commission européenne, dans son livre blanc de 2001 (Union européenne. Commission européenne, 2001), rappelle que l'objectif du découplage ne doit pas faire oublier que « l'Europe a

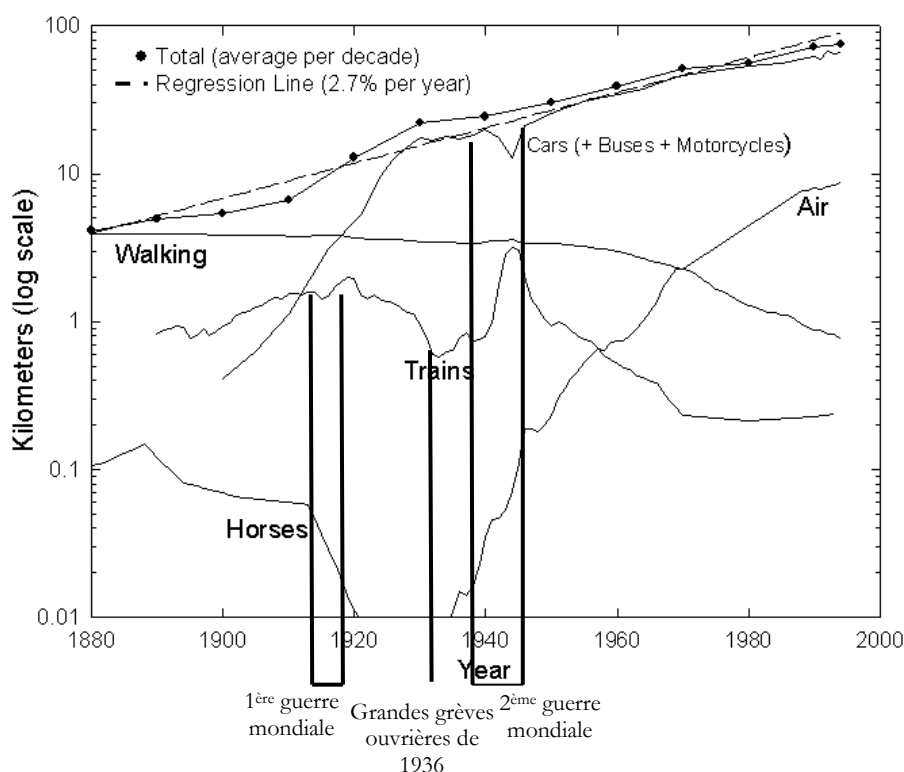
absolument besoin de systèmes de transport efficaces pour assurer sa prospérité, compte tenu de l'incidence de tels systèmes sur la croissance économique et le développement social. » Et, en 2005, Jacques Barrot, alors vice-président de la Commission européenne, de rappeler que la mobilité ne peut être freinée, car la croissance économique implique une croissance des transports. Pour lui, la mobilité est un atout majeur pour la compétitivité et pour l'emploi. Il ne faut donc surtout pas mettre en péril la connexion qui existe entre le taux de croissance des transports, donc des mobilités, et le taux de croissance du PIB. Il reste cependant les effets négatifs des transports qu'il faut réussir à modérer. Dans ces circonstances, les actions envisageables sont très limitées.

Lors d'un entretien avec Yves Crozet, professeur IEP - chercheur au sein du Laboratoire d'Économie des Transports (LET), UMR CNRS 5593 à Lyon, en juin 2011, celui-ci présentait, à l'inverse, les pratiques de mobilité actuelle comme le résultat de la croissance économique. Il a été observé que depuis plusieurs siècles, lors des périodes de croissance économique, il y avait de la mobilité en plus, c'est-à-dire une augmentation des distances globales parcourues, et cela selon une corrélation presque complète (proche de 1). À cette corrélation s'ajoute le paramètre de l'évolution technologique des modes de transport qui sont de plus en plus rapides. L'analyse de l'évolution des pratiques en matière de mode de transports aux États-Unis entre 1880 et 1990 effectuée par Arnulf Grübler en 1990 (Figure 5) illustre parfaitement les reports modaux au cours du temps vers des modes toujours plus rapides. On remarque également une augmentation globale des distances quotidiennes parcourues. Les irrégularités que l'on peut observer dans l'utilisation des chemins de fer ont des explications socio-économiques. En effet, en 1936 le monde ouvrier américain se soulève et entre en grève pour plusieurs mois (grèves à General Motors de décembre 1936 à février 1937). Cet épisode est suivi par le début de la Deuxième guerre mondiale. Les États-Unis sont alors le premier producteur et fournisseur de carburant mondial. Afin d'honorer les contrats passés avec les pays européens, l'essence est rationnée à 9 litres par personne et par semaine. Selon Mike Davis, « quand, en raison du rationnement et du trafic, le réseau des tramways et des bus du pays parvint à saturation, il devint urgent d'inciter les travailleurs au covoiturage ou d'adopter des modes de transports alternatifs ». C'est le président Roosevelt lui-même qui appelle la population à sauvegarder les ressources en caoutchouc (dont les stocks sont réservés à l'équipement des véhicules militaires). Pour éviter l'usure généralisée des pneus, il encourage le covoiturage et la circulation à faible vitesse (55 km/h au maximum). Le covoiturage fut aussi encouragé par des réductions de prix sur l'essence, de fortes amendes pour les amateurs de balades automobiles en solitaire et des slogans agressifs, comme celui de l'affiche qui proclamait :

« Quand vous conduisez SEUL, vous conduisez avec Hitler ! » (Davis, 2008)

On observe alors un report modal massif de l'automobile vers les chemins de fer durant cette période.

Figure 5. Distances des déplacements quotidiens effectués par les américains selon les modes de transport entre 1880 et 1990 - Source : d'après Grübler – 1990, ajouts Julie Prud'homme - 2013



Ce constat amène à des situations impossibles car, si on prolonge les tendances observées de croissance des distances globales parcourues proportionnellement à la croissance du PIB, cela nous amènerait à effectuer des déplacements quotidiens de plus en plus long, de plusieurs centaines de kilomètres. Ceci n'est mécaniquement pas possible, les vitesses des transports actuels restent limitées. Cela a été modélisé par Y. Zahavi avec la maximisation de la fonction d'utilité du transport sous les contraintes de revenus et de temps (Zahavi, 1974).

Comme le font remarquer Schafer et Victor en 2000, les gens allouent toujours la même part de leurs revenus à leurs déplacements. L'augmentation des revenus provoque donc une augmentation des demandes de mobilité. Comme les ménages consacrent également toujours la même durée pour cette nouvelle demande, ils se tournent alors vers les modes de transport les plus rapides. Ce constat est très bien illustré par la situation de la Chine où le niveau de vie des ménages augmente en même temps que l'appétit pour la vitesse. Dans la Chine « post-maoïste », avec l'individualisation des déplacements et un contexte industriel favorable, la bicyclette a assuré une accessibilité urbaine quasi

universelle avant d'être détrônée au milieu des années 1990 par un système plus puissant : le système automobile. Le passage à la mobilité motorisée correspond à une demande pour des déplacements plus longs, plus rapides et plus confortables et à un pouvoir d'achat de plus en plus important des individus. Il est également un signe extérieur de richesse. En se développant dans un premier temps par la conduite de scooters, cette mobilité motorisée à désormais tendance à suivre une diffusion de plus en plus large de la voiture individuelle privée, mode de transport toujours plus rapide (Doulet, 2006). Cette recherche de vitesse ne pourra pas durer longtemps, surtout dans des contextes de très forte densité de population.

Toujours selon Schafer et Victor, en 2000, les Américains parcourraient en moyenne 70 km par jour dont déjà 15 % en avion. Cela est complètement corrélé à la croissance économique du pays. Si on poursuit la corrélation, à l'horizon 2050-2100, les américains parcourraient 700 km par jour. Étant donné que les personnes ne peuvent consacrer que 2 heures en moyenne pour leurs déplacements quotidiens, il faudrait atteindre une vitesse moyenne de déplacement de 600 km. Actuellement, pour ceux qui prennent l'avion pour se déplacer quotidiennement de porte-à-porte, la vitesse est à peine supérieure à 200 km. Il y a là une limite technologique actuellement infranchissable : les gains de vitesse ne sont techniquement plus possibles (on peut penser ici au Concorde). Il y aura donc un moment où un phénomène de découplage, donc un ralentissement de la mobilité (soit une réduction des distances globales parcourues), s'opèrera.

Extrait de l'entretien avec Yves Crozet, Juin 2011

Bien qu'actuellement on observe un découplage absolu pour l'automobile dans les pays européens, c'est-à-dire que la mobilité en automobile stagne alors que la croissance économique continue, nous n'avons pas « trouvé le découplage ». Dans les faits, la croissance de la mobilité s'est reportée sur les modes de déplacement rapides (les trains, les avions). En effet, si on regarde l'ensemble des moyens de transport motorisé, la mobilité totale continue d'augmenter avec la croissance économique même si la corrélation est moindre. En fait, on assiste à un découplage relatif, la mobilité augmente mais les impacts sur l'environnement stagnent ou réduisent. L'usage des trains électriques (exemple des TGV), en considérant que l'électricité est produite de manière « propre », permet une augmentation de la mobilité sans pour autant augmenter la quantité de polluants dans l'atmosphère. C'est ce que l'on retrouve dans les perspectives du Grenelle de l'environnement de 2007 qui présentent la mobilité durable comme une mobilité qui continue d'augmenter en utilisant des modes alternatifs, des transports durables, qui n'émettent pas ou peu de polluants atmosphériques.

- Équité spatiale des politiques de transport

La considération de l'équité spatiale dans les politiques publiques de transport est un autre niveau d'analyse économique des transports. En effet, un système de transport irrigue un espace dont tous les lieux ne jouissent pas de la même accessibilité. Cela soulève des problèmes d'inéquité spatiale face au droit de transport. Les problèmes d'équité sont abordés par les économistes sur le terrain des inégalités sociales et sur la redistribution des revenus. L'équité spatiale désigne les logiques de redistribution « d'avantages » spatiaux. Elle est l'un des principes fondateurs des politiques d'aménagement actuelles. Une politique « souhaitable » doit ainsi être celle d'une « recherche de l'équité spatiale, consistant à donner des chances comparables de développement à chacun des territoires urbains ou régionaux en résorbant du mieux possible leur déficit d'accessibilité ». (Bonnaïfous et Masson, 2003)

La prise en compte de l'équité spatiale pose des problèmes aux économistes, car paraissant parfois en contradiction avec l'objectif économique principal des politiques. En effet, l'objectif économique premier des politiques de transport est « l'allocation optimale des ressources » qui imposent une « exigence de recherche d'efficacité sous contrainte de rareté, une solution non optimale étant source de gaspillage ». Le caractère normatif de l'équité spatiale vient en contradiction avec la recherche d'efficacité (Bonnaïfous et Masson, 2003).

Le « dilemme efficacité/équité » est présenté de la sorte (Duranton, 1997) :

- soit favoriser la concentration pour être efficace et donc avoir une plus forte croissance dans la compétition internationale en développant les pôles de compétitivité ou d'excellence ;
- soit mener une politique d'équité territoriale qui conduit à saupoudrer les ressources entre des régions n'affichant pas les mêmes performances, ce qui aboutirait à l'inefficacité et au gaspillage.

Ce « dilemme » met en évidence la difficulté de considération de l'intérêt général dans les démarches économiques. La question de l'équité spatiale ou territoriale, qui a des répercussions sociales indéniables, est analysée par les spécialistes en sociologie, avec le principe « d'inégalité d'accessibilité ».

b. Aspects sociaux des transports

Comme nous l'avons vu précédemment, la dimension sociale n'est que trop rarement considérée dans les approches « durables » des projets, autant dans la théorie que dans la pratique. Cette dimension est celle qui est au plus proche des enjeux des individus ; elle a donc des implications concrètes. Les impacts sociaux sont souvent indirects, donc difficilement mesurables et quantifiables, ce qui complexifie leur évaluation.

La question de l'équité spatiale posée par les économistes est analysée par les sociologues qui prennent en compte les inégalités sociales et spatiales dans la mobilité. En effet, les enjeux sociaux et spatiaux des politiques sont directement liés aux exigences de l'égalité de droit et de chance. Une « équité territoriale » est définie par (Raux et Souche, 2001) comme devant assurer pour tous (individus et espaces) un droit d'accès aux biens et aux services. Identifier les enjeux sociaux d'une politique de transport revient à en caractériser ses impacts et conséquences possibles sur les espaces et les individus. Ces enjeux sont analysés sous l'angle des inégalités entre individus et entre territoires d'échelle comparable.

Les évolutions actuelles montrent que le processus de métropolisation à l'œuvre est caractérisé par un triple phénomène de concentration, d'étalement urbain et de ségrégation spatiale intra-urbaine. Celui-ci se traduit notamment par une polarisation et une spécification des territoires, comme nous l'avons détaillé plus haut, dans la partie « La ville, un objet durable ? » (p. 54). Les distances de migrations alternantes augmentent sans cesse pour ceux qui ont accès au travail (Mignot, 2004). La croissance de l'usage de l'automobile personnelle ainsi que l'amélioration des performances des transports collectifs ont permis aux individus de bénéficier d'un bouquet d'équipements plus

important. Cependant, la mobilité des individus révèle des discriminations et des inégalités. En effet, des inégalités de mobilité sont perceptibles selon les profils socio-économiques et selon les territoires. Les inégalités liées aux ressources des ménages se traduisent par des inégalités d'accès aux moyens de déplacement. Les individus les plus « aisés » financièrement auront plus de facilité à réserver une part conséquente de leurs revenus à cet effet que les ménages les moins favorisés. Le paramètre de l'âge a aussi son importance. Selon leur position dans le cycle de vie, les individus auront plus ou moins la capacité d'utiliser certains modes de déplacement, d'où une limitation des espaces accessibles. Plus les individus ont de facilités à se déplacer, plus ils bénéficient des opportunités disponibles sur le territoire. La capacité de mobilité constitue ainsi un « potentiel d'accès aux ressources » (Caubel, 2003) et un générateur d'inégalités. Le territoire en lui-même a également une influence. Comme nous l'avons vu dans la partie « La ville, un objet durable ? » (p. 54), certaines formes urbanisées favorisent les longues distances. Selon l'efficacité de l'offre de transports dans ces espaces, la discrimination territoriale sera plus ou moins forte quant à la capacité de mobilité des individus concernés. Un territoire peu dense, mal desservi par les transports collectifs rend ses habitants dépendants de l'usage de l'automobile. Si certains ne sont pas en capacité d'utiliser ou de posséder un véhicule, ils se retrouvent captifs.

Quelle qu'en soit l'origine, ces inégalités de capacité de mobilité des individus créent des disparités d'accès à la ville.

Un transport socialement durable doit donc permettre à tout individu, où qu'il se trouve sur le territoire, de se déplacer vers un maximum de lieux stratégiques. Cette accessibilité doit ainsi permettre d'augmenter la taille du marché de l'emploi accessible aux individus, quel que soit leur profil socio-économique, et ainsi favoriser leur insertion sociale et professionnelle.

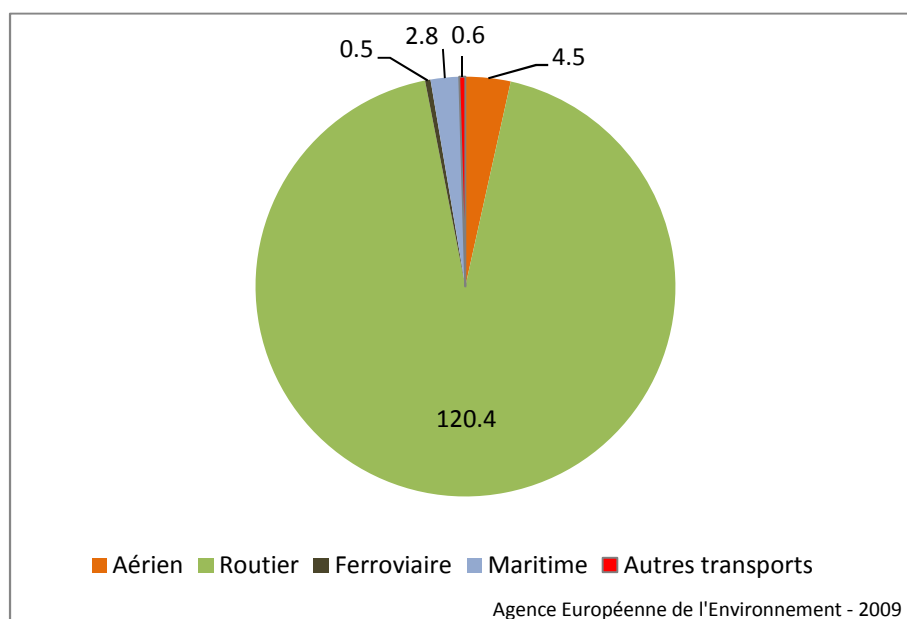
Les transports ont également des impacts directs sur les individus. En effet, on observe des problèmes de santé publique liés à la circulation automobile. Les gaz d'échappement des véhicules mais aussi les nuisances sonores peuvent avoir des conséquences non-négligeables sur eux. De la même manière, la simple présence des véhicules dégrade la perception du paysage par les individus et ainsi détériore leur bien-être dans leur environnement.

c. Impacts environnementaux des transports

Dans les pays de l'OCDE, les transports routiers sont responsables de la plupart des effets que le secteur des transports a sur l'homme et sur son environnement. Ils sont à l'origine de la plupart des

accidents et de la majorité des émissions de polluants atmosphériques (Figure 6), des émissions sonores et des dégradations des habitats. Les transports maritimes, bien que leur impact sur l'environnement soit généralement plus faible, suscitent des inquiétudes à cause des marées noires provoquées par les accidents graves. Plus récemment, l'impact environnemental du transport aérien, qui enregistre une croissance forte dans le domaine du tourisme, est devenu lui aussi préoccupant (OCDE, 2007).

Figure 6. Émissions de CO₂ par les différents modes de transport en France en 2009 (en millions de tonnes)



- Pressions sur la nature et les paysages

L'affectation de sol au secteur des transports est une décision qui engendre à la fois de l'activité de transport (mobilité induite par les infrastructures) et du stress environnemental. La fragmentation des territoires est un phénomène très difficilement réversible. Elle crée une discontinuité dans les paysages qui d'une part peut être la cause d'une perte de biodiversité en traversant des corridors biologiques et en perturbant ainsi la faune dans ses déplacements et son accès à la ressource alimentaire ; d'autre part, elle peut paraître « inesthétique » dans l'appréhension des paysages par les individus. Si le deuxième aspect n'est pas évident à considérer de manière objective, le premier est analysé et pris en compte dans les projets de construction des nouvelles infrastructures avec la mise en place de « Trames vertes et bleues ». Mesure phare du Grenelle de l'environnement, elle porte l'ambition d'enrayer le déclin de la biodiversité au travers de la préservation et de la restauration des continuités écologiques.

La Trame verte et bleue est un outil d'aménagement du territoire qui vise à (re)constituer un réseau écologique cohérent, à l'échelle du territoire national, pour permettre aux espèces animales et végétales de circuler, de s'alimenter, de se reproduire, de se reposer, en d'autres termes, d'assurer leur survie, et ainsi permettre aux écosystèmes de continuer à rendre à l'homme leurs services. Les continuités écologiques correspondent à l'ensemble des zones vitales (réservoirs de biodiversité) et des structures spatiales (corridors écologiques) qui permettent à une population d'espèces de circuler et d'accéder aux zones vitales. La Trame verte et bleue est ainsi constituée de réservoirs de biodiversité et de corridors qui les relient (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2012).

Selon divers organismes (EEA ; IFPEN ; ADEME), cette pression sur l'environnement doit être dûment prise en considération dans la décision initiale de construction d'une nouvelle infrastructure de transport. Le problème essentiel consiste à faire en sorte de tirer parti d'un accès au transport de grande qualité tout en préservant des terrains suffisamment grands pour la biodiversité et les fonctions sociales et récréatives.

- Bruit

« La pollution sonore n'est pas seulement une nuisance environnementale mais aussi une menace pour la santé publique »

Zsuzsanna Jakab, directrice régionale de l'OMS pour l'Europe.

Le frottement de roues sur le revêtement des routes (qui varie selon le revêtement), le bruit des moteurs selon le régime moteur pratiqué, les accélérations et autres paramètres mécaniques sont autant de sources de nuisances sonores provoquées par la circulation automobile. Au-delà du fait que cela peut être très désagréable, l'OMS a identifié des réels impacts sur la santé publique.

Selon les experts de l'OMS, dans la partie occidentale de la Région européenne de l'OMS, le bruit causé par la circulation concourt chaque année à la perte de plus de 1 million d'années de vie en bonne santé suite à la morbidité (nombre d'individus atteints par une maladie dans une population donnée et pendant une période déterminée) (Larousse, 2012), des invalidités ou d'une mortalité prématurée. Les nuisances sonores sont à l'origine non seulement de désagréments et perturbations du sommeil, mais aussi de crises cardiaques, de troubles de l'apprentissage et d'acouphènes.

Parmi les facteurs environnementaux observés en Europe, le bruit ambiant provoque une charge de morbidité qui, en importance, est seulement dépassée par celle de la pollution atmosphérique. En

effet, une personne sur trois est exposée à des nuisances sonores pendant la journée, et une sur cinq présente des troubles du sommeil dus à des nuisances induites par le bruit des transports routiers, ferroviaires et aériens. Le risque induit de maladies cardiovasculaires et d'hypertension artérielle est plus important.

- Automobiles et pollutions atmosphériques

La loi sur l'air du 30 décembre 1996 :

« [...] *Droit reconnu à chacun à respirer un air qui ne nuise pas à sa santé* »

Les deux principales nuisances environnementales de l'automobile sont la pollution de l'air et l'émission de gaz à effet de serre (GES). Alors que la loi sur l'air considère que l'émission de GES fait partie de la pollution atmosphérique, on distinguera ici les deux composantes. En effet, les enjeux ne sont pas de même nature. Les émissions de polluants et de GES sont directement liées à la consommation de carburant par le fonctionnement des moteurs à explosion qui équipent les véhicules. Elles sont la conséquence de la combustion parfois incomplète du carburant (essence, diesel). Les différents gaz et substances rejetés ainsi dans l'air participent pour certains à la pollution atmosphérique, d'autres sont impliqués dans le phénomène d'effet de serre.

En Europe, près d'un tiers de l'énergie globale est utilisée par les transports. Alors que dans certains domaines, l'utilisation de l'énergie se stabilise, pour les transports, elle ne cesse d'augmenter (Agence européenne pour l'environnement, 2012). En effet, les transports sont indispensables dans notre société moderne, dans laquelle on a toujours besoin d'aller plus vite, plus loin et partout (Dupuy, 1991). Ces pratiques ne sont pas sans effets sur l'environnement, et donc sur la santé publique, du fait de l'émission de gaz et de substances polluantes dans l'atmosphère direct.

Certains de ces polluants sont dits **primaires**, directement émis par les sources de pollution, c'est-à-dire diffusés dans l'atmosphère sans réaction chimique après leur émission. Le Tableau 1, indique les caractéristiques des principaux polluants primaires d'origine automobile.

Tableau 1 - Les principaux polluants primaires d'origine automobile et leurs effets sur la santé publique

Source : Rapport n°113 du Sénat - 2001

Nom	Symbole chimique ou acronyme	Origine	Dommmages
Monoxyde de carbone	CO	Combustion incomplète des carburants	Troubles respiratoires et cardiovasculaires (réduction de la concentration d'oxygène fournie à l'organisme)
Oxydes d'azote	NO _x	Combustion de carburants	Dioxyde d'azote : troubles respiratoires, désagréments oculaires
Particules fines (de taille inférieure à 10 micromètres)	PM 10	Véhicules (en particulier équipés d'un moteur diesel)	Troubles respiratoires et cardiovasculaires. Les personnes âgées, les enfants et les personnes souffrant de pathologies pulmonaires ou cardiovasculaires chroniques sont particulièrement sensibles aux particules
Composés organiques volatils (dont les hydrocarbures)	COV (hydrocarbures : HC)	Évaporation de l'essence et combustion incomplète	Certains sont nocifs (le benzène serait cancérigène)
Dioxyde de soufre	SO ₂	Combustion de carburants soufrés	Troubles respiratoires et cardiovasculaires Pluies acides (acide sulfurique, H ₂ SO ₄)

S'ajoutent à ceux-ci des polluants **secondaires** (substances résultant de la transformation chimique de composés dits précurseurs), comme l'ozone troposphérique, agressif, en opposition à l'ozone stratosphérique protecteur, et des **gaz à effet de serre** (GES). Ces dernières substances sont appelées « polluants globaux » du fait qu'ils impactent la planète dans son intégralité contrairement aux polluants primaires et secondaires, polluants « locaux » qui touchent les espaces proches du lieu d'émission.

Que l'on parle des polluants participant à la pollution de l'air ou des GES compte tenu des leurs effets dévastateurs, il est apparu depuis une vingtaine d'années d'en réduire les quantités présentes dans l'atmosphère, et donc leur émission. Il est possible d'agir sur la technologie des moteurs pour les rendre plus « propres », mais même si des progrès ont été faits dans ce domaine, cela n'est pas suffisant : les quantités de polluants rejetées dans l'atmosphère restent trop importantes.

L'estimation de ces émissions par la circulation automobile pour pouvoir envisager les impacts de nouvelles mesures ou aménagements, est alors un enjeu prioritaire que ce soit en milieu urbain ou rural.

Conclusions sur le transport durable

La mise en place de transports durables peut passer soit par le réaménagement de l'existant, soit par le renouvellement des usages. Il est en effet possible de modifier le tracé des lignes de bus, en augmenter le nombre, les allonger ou les étendre, en augmenter la fréquence. Il est également possible d'améliorer le cadencement des trains pour favoriser la multimodalité lors des déplacements ; l'aménagement de voies cyclables et/ou piétonnes agréables et sécurisées peut également être envisagé ; ceci dit, pour évoquer les différents modes de transport qui peuvent concurrencer l'usage du véhicule personnel, tout au moins sur certains aspects de la mobilité urbaine. Un renouvellement des usages passe par une modification d'ordre organisationnel. On utilise des technologies usuelles que l'on n'emploie pas de manière traditionnelle. Un renouvellement des usages de l'automobile est ainsi envisagé comme transport collectif, en favorisant le regroupement des voyageurs dans les véhicules, non plus comme un véhicule individualiste.

Certes, on pourrait espérer que ces besoins de déplacements réduisent dans les années à venir, la vie s'organisant à des échelles plus locales [OCDE - 96]. Hélas, les leviers d'action sont à très longs temps de réponse (aménagement du territoire et urbanisme), ou insuffisants (taxation des carburants ou tarification des accès), sans compter les obstacles d'ordre socio-psychologiques (« j'ai les moyens donc j'ai ma grosse voiture »).

Cette limitation du nombre de véhicules semble incontournable de nos jours, quels qu'ils soient (moteurs à combustion ou électriques). En effet les coûts (économiques et environnementaux) des véhicules personnels sont à prendre en compte sur tout leur cycle de vie (de la fabrication à la destruction). On voit actuellement en France combien la fermeture des usines automobiles est problématique (économiquement et socialement) et on mesure le chemin psychologique qu'il reste à parcourir quand on voit comment est annoncée dans la presse la réduction de 15% des ventes de véhicules particuliers en 2012, sans mention aucune du moindre impact potentiellement bénéfique sur l'environnement.

Chapitre 3 Les TAD, une réponse à la durabilité ?

Le Transport à la Demande (TAD) est un système de transport qui propose un usage collectif des véhicules automobiles, par opposition à l'usage des véhicules personnels (VP). Entre l'usage des taxis et celui des transports en commun classiques, il propose un service à la fois flexible dans le temps et dans l'espace à la manière des taxis, et il permet le partage des véhicules, comme les transports en commun. À la manière des taxis, il n'est déclenché qu'à la suite de la demande d'un ou plusieurs usager(s). Les TAD sont souvent proposés en alternative ou en complémentarité aux lignes de bus classiques pour mieux adapter les systèmes de transports collectifs aux réalités des territoires. Ils permettent entre autres le désenclavement de certaines populations ou proposent simplement une alternative à l'automobile personnelle, souvent utilisée en « solo ».

1. Quelques repères sur les transports à la demande

Les systèmes de TAD ont été développés dans un premier temps aux États-Unis il y a une quarantaine d'années (Desiderio, 2005), où ils ont été désignés comme « taxi collectifs », le développement et la démocratisation de l'outil informatique les a fait évoluer vers un système organisé autour d'une centrale de réservation.

A. Définitions

Comme l'a écrit Elodie Castex en introduction de sa thèse en 2007, « le TAD ne peut être résumé en quelques phrases sous peine d'orienter les propos ou de n'en fournir qu'une conception particulière. » (Castex, 2007). Cependant, la définition donnée par Le Breton (2001) concilie assez bien les différentes caractéristiques des TAD que nous considérerons dans notre recherche :

« [Le TAD est] un service de mobilité, généralement assuré par des taxis ou des minibus dont la particularité est d'être mis en œuvre sur réservation des utilisateurs. Ces systèmes intermédiaires entre la voiture et le transport collectif semblent adaptés aux nouveaux comportements de mobilité quotidienne des citoyens. »

Le Breton, 2001

Nous élargissons tout de même l'usage des TAD à tout type de territoires, non aux seules zones urbaines comme il est supposé ici. Malgré les différentes modalités des TAD selon les pays et les époques, ils sont toujours caractérisés par leur flexibilité. Que ce soit du point de vue des horaires ou de celui des trajets effectués, ceux-ci sont définis en fonction de la demande des usagers. Les zones d'un territoire donné sont desservies en fonction des besoins des usagers, qui, par là même,

pratiquent et fabriquent ce territoire. Pour avoir une revue détaillée sur les TAD en France et ailleurs dans le monde en 2007, (voir (Castex, 2007)).

En 1982, la Loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) est publiée en France (Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982). C'est la loi fondamentale pour l'organisation des services publics de transport en France. Le transport à la demande est alors juridiquement un transport qui doit permettre de se déplacer « dans des conditions raisonnables d'accès, de qualité et de prix ainsi que de coûts pour la collectivité », tel un service public de transport. Il doit être organisé pour le compte d'autrui (définition du service public) et non pas pour son compte propre (cas du transport privé). Le TAD contribue, au même titre que les services réguliers, à assurer un service public de transport en France. Il relève de l'intérêt général et participe « à la solidarité nationale, au développement économique et social, à l'aménagement équilibré et au développement durable du territoire [...] » (article 1 de la LOTI). Néanmoins, à l'instar du bus ou des autocars, le transport à la demande bénéficie de subventions pour son fonctionnement. Une part plus ou moins grande du prix d'un trajet est payée par la collectivité, l'autre part revient à l'utilisateur. En réalité, peu de ces services sont autonomes financièrement et ils dépendent en très grande partie de fonds publics (Banos, Izembard et Josselin, 2002).

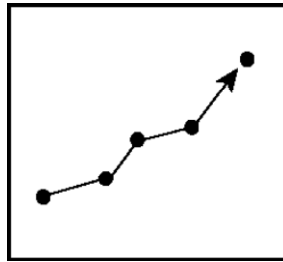
B. Différentes stratégies de TAD

Il existe différentes stratégies de déploiement des TAD sur les territoires. Pour remplir ses missions fixées par la LOTI, un TAD peut fonctionner sur un territoire de différentes manières, avec des organisations variées que ce soit des points de vue temporel (horaires programmés fixes / horaires souples) et spatial (trajets fixes / trajets créés selon la demande) :

a. Lignes fixes à déclenchement ou lignes virtuelles

Les **lignes fixes à déclenchement** ont un fonctionnement très proche de celui des systèmes des bus et autocars réguliers. En effet, ce sont des lignes qui ont un tracé précis, des horaires définis et des arrêts fixes. La seule particularité est qu'un véhicule n'est mobilisé que si la demande en a été faite par au moins un utilisateur. Cette solution peut être adaptée lorsque la demande est faible mais géographiquement concentrée. Elle apparaît souvent coûteuse quand elle est ramenée au nombre d'utilisateurs.

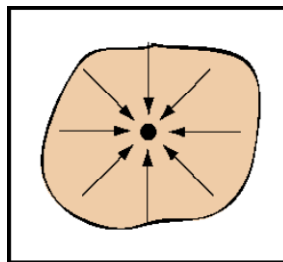
Figure 7. Ligne à déclenchement
source : Elodie Castex - 2007



b. TAD en rabattement

Un **TAD en rabattement** (aussi appelé convergent ou semi-polarisé) est un système qui ne concerne que des déplacements reliant un (ou quelques points précis) à tout ou partie du territoire. Une extrémité est imposée mais l'autre est variable en fonction des demandes. On trouve ce type de TAD pour la desserte des gares, des marchés, etc.

Figure 8. TAD en rabattement, polarisé
source : Elodie Castex - 2007



c. Point-à-point

Le **TAD en porte-à-porte** prévoit la prise en charge des usagers à l'endroit qu'ils désirent, où qu'ils se trouvent sur le territoire, pour les conduire à un autre lieu de leur choix sur ce territoire. Ce système est le plus souple. La seule contrainte est celle du délai de réservation préalable, qui peut varier selon les systèmes. Le TAD en porte-à-porte est très proche du système des taxis, en y ajoutant la possibilité de regrouper différentes courses lors d'un même circuit (ce qui est interdit aux taxis). Selon Didier Josselin, le TAD en porte-à-porte est le service « idéal » du point de vue de l'utilisateur. Néanmoins, il met en garde sur le fait que les compagnies de taxis pourraient considérer ce type de service, comparable à du « taxi subventionné », comme une concurrence déloyale (coût de la course moins élevé pour l'utilisateur).

Le **TAD d'arrêts à arrêts** suit une stratégie similaire à celle des TAD en porte-à-porte mais les lieux de prise en charge sont plus contraints. Ce sont des arrêts définis au préalable, plus ou moins matérialisés dans l'espace.

Figure 9. TAD de porte -à-porte
source : Elodie Castex - 2007

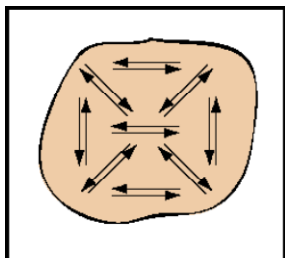
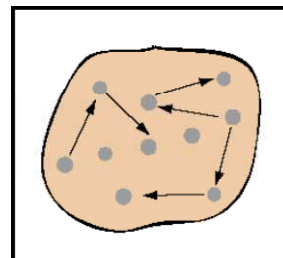


Figure 10. TAD en arrêt à arrêt
source : Elodie Castex - 2007



C. Les freins au développement des TAD

a. Les habitudes et les représentations

Tout le monde a des habitudes de déplacements, combinaison de destinations, d'horaires et de modes de transport empruntés. Ces habitudes sont parfois contraintes par la vie sociale (travail, localisation des différentes aménités, etc.), mais aussi de façon plus individuelle (famille, amis, lieux de loisirs, etc.).

« La minimisation des temps de déplacement n'est pas une simplification acceptable des pratiques de transport de la vie quotidienne. Il y a certes des relations entre les temps de déplacements et les pratiques modales, mais en aucun cas une relation causale mécanique, loin s'en faut. »

Vincent Kaufmann - 1997

L'utilisation des TAD par les individus nécessite de leur part un report modal. Celui-ci devra se faire principalement à partir de l'automobile particulière. Un tel report engage le changement d'un comportement routinier et ancré. De plus, automobile et transports collectifs sont associés à des représentations sociales contraires. Les TAD subissent de prime abord des préjugés associés aux transports collectifs, parce qu'ils diffèrent du véhicule personnel stationné devant le logement et disponible dans la minute.

- Représentations sociales de l'automobile : un bénéfice individuel important

L'automobile est un instrument de liberté individuelle. Elle est un objet de représentation sociale à laquelle on attache les symboles de liberté, de luxe, de puissance, de plaisir et de sérénité. Elle est

également associée à des valeurs propres à notre culture : la vitesse, l'individualisation, la privatisation du déplacement. La voiture (son type, sa taille, sa gamme) a longtemps été un marqueur d'ascension sociale (Thomann, 2002).

Le bénéfice individuel tiré de l'utilisation de l'automobile est très important, et il est concret autant que symbolique (Rubens, Gosling et Moch, 2011). La transmission de ces valeurs se fait entre les générations (Thomann, 2002). On commence par payer le permis de conduire aux enfants avant de leur faciliter l'achat de leur première voiture qui devient symbole d'autonomie et d'indépendance.

- Représentations sociales des transports collectifs : des bénéfices collectifs

L'utilisation des transports collectifs, quant à eux, n'apporte qu'un bénéfice neutre. Il n'est lié à aucune émotion positive (Rubens, Gosling et Moch, 2011). Les représentations associées au transport collectif sont liées à des expériences passées, à la manière dont les déplacements ont été perçus et vécus par l'individu. D'une part, les transports collectifs sont empreints de représentations stéréotypées. L'utilisation des transports collectifs est parfois associée à des situations sociales bien précises (pour les plus démunis, les jeunes scolaires, les personnes âgées seules) (Thomann, 2002). Ainsi, les transports collectifs sont synonymes de captivité, de manque d'autonomie. D'autre part, ils engendrent un sentiment de contrainte lié à la fixité des horaires, en opposition totale avec le véhicule personnel qui est toujours disponible.

- Un report modal nécessaire

Une étude effectuée sur Marseille en 2002 (Thomann, 2002) met en évidence que le report modal de l'automobile aux transports collectifs est souvent produit de manière contrainte, notamment dans les zones périphériques et pour un objectif précis (souvent pour se rendre au travail). Une personne qui est ainsi contrainte d'utiliser les transports collectifs à un moment donné, ne les utilisera peut-être pas de manière pour se rendre au même endroit pour un autre motif.

De plus, l'appréciation, liée à leur perception, des temps de déplacement limite la rationalité des choix modaux en fonction de celle-ci. Les biais de perception des temps de déplacement découlent des phénomènes d'auto-valorisation de pratiques propres à tout individu. Lorsqu'un usager utilise un moyen de transport pour un déplacement donné, il considère qu'il minimise son temps de déplacement. Selon Kaufmann (1997), il existe une prédisposition générale à l'utilisation de l'automobile qui a fait qu'un usager en situation de se déplacer en automobile ou en transports

publics aura tendance à choisir l'automobile indépendamment de la comparaison des temps. Cette préférence découle des caractéristiques intrinsèques de la mobilité offerte par l'automobile et en particulier de la continuité du déplacement qu'elle assure. Il constate également une forte concordance entre la rapidité comparée des moyens de transport et les pratiques modales des individus qui découle du fait que l'automobile est souvent plus rapide que les transports publics. Il met en garde quant à l'amalgame de cette congruence avec les raisons qui sous-tendent les pratiques modales. En effet, pour une certaine classe d'individus qui se déplacent exclusivement avec leur véhicule personnel, les transports publics ne sont que rarement utilisés, même s'ils sont plus rapides que l'automobile.

Selon Kaufmann, la confusion entre un fait (la voiture est souvent plus rapide) et une explication (la voiture est utilisée parce qu'elle est plus rapide) permet de comprendre pourquoi une approche postulant la minimisation des temps continue à être si souvent usitée pour aborder les pratiques modales. L'amélioration des vitesses de déplacement en transports publics n'est donc pas forcément de nature à pouvoir susciter des reports modaux importants de l'automobile vers les transports publics pour de courts trajets. On comprendra alors pourquoi les investissements dans de nouvelles infrastructures de transports publics et dans l'offre proprement dite ne provoquent pas des reports modaux importants depuis l'automobile [*op. cit.*].

Il ressort des travaux de Thomann (Thomann, 2002) que certains individus voient l'automobile comme un objet qui se mérite, et les transports collectifs comme « le purgatoire nécessaire à son obtention ». Le changement de comportement nécessaire pour un report modal ne peut se faire que de manière volontaire de la part des individus.

Pour qu'un report modal s'opère vers les TAD, il faut parvenir à les présenter comme un mode de transport à part entière et non comme une nouvelle forme de transports collectifs. Il est nécessaire que les représentations sociales des TAD ne soient pas créées *a priori*, avant même qu'ils soient testés, à partir de celles associées aux transports collectifs.

b. L'aptitude des usagers à utiliser les transports

Une recherche sur les éléments qui déterminent les choix de mobilité (Flamm, 2004) a été menée auprès de 44 personnes aux pratiques très diversifiées. Elle a fait émerger un facteur fondamental du comportement de mobilité : l'aptitude à utiliser un moyen de déplacement. En apparence banal, l'acte de se déplacer implique un ensemble d'activités motrices et cognitives : il faut maîtriser les

opérations élémentaires du mouvement (marcher, pédaler, guider le véhicule, accélérer, freiner, etc.), identifier des obstacles, anticiper les mouvements d'autres personnes ou véhicules, se repérer dans l'espace, décider par où passer, respecter des règles (code de la route, normes sociales de « bonne conduite », achat de titres de transport), veiller à être à l'heure. Ces tâches requièrent des aptitudes plus ou moins spécifiques aux différents modes de déplacement, voire aux différents types de services d'un même moyen de transport. Les modes d'exploitation, par exemple, peuvent varier entre les services réguliers ou sur demande. Pour les TAD, le problème de la ponctualité est crucial. En revanche, ils sont une solution pour les personnes que n'ont pas, ou plus, le permis de conduire, ou qui sont handicapées.

L'utilisation des TAD suppose que la personne est à même de planifier et réserver son déplacement, de comprendre les conditions d'utilisation du service et les différentes subtilités inhérentes au TAD. Il faut donc imaginer des systèmes au fonctionnement et à l'ergonomie suffisamment simples, qui les rendent accessibles au plus grand nombre.

c. Des contraintes temporelles

La souplesse des systèmes de transport à la demande permet en théorie de répondre à la diversité des besoins en mobilité selon la nature des territoires (urbain, rural, périurbain) et selon les objectifs visés par le service (choix politiques, commerciaux, etc.). Cependant, il existe un véritable frein à l'utilisation de ce type de service : les contraintes temporelles (Bailly et Heurgon, 2001). En effet, les exigences d'instantanéité et d'immédiateté augmentent dans la société actuelle. Or, pour remplir l'objectif de regroupement des voyageurs dans les véhicules, il est indispensable que chaque usager accepte d'**anticiper** son déplacement pour réserver le service à l'avance, et que son **temps de parcours soit allongé** pour permettre d'éventuels détours pour la prise en charge d'autres passagers.

2. TAD et durabilité : premiers éléments

La grande flexibilité du TAD permet d'inventer des systèmes dont les stratégies de déploiement s'adaptent aux territoires concernés et à leurs enjeux. Mais est-il pour autant possible d'assurer qu'ils respectent globalement mieux les trois piliers de la durabilité cités précédemment (rentabilité économique, équité sociale, performance environnementale), que le système existant ?

Les TAD sont actuellement envisagés lors de la définition de politiques de transport ou d'urbanisation (en France : PDU, PLU, SCOT, etc.) dans le cadre du développement durable. Mais il s'agit d'une sorte de déclaration d'intention. En effet, on constate, en y regardant de plus près, qu'ils ne sont pas optimisés selon tous les indicateurs de durabilité, ou bien que les données quantifiées manquent pour en juger, par exemple, du point de vue économique (ils sont fortement subventionnés) et environnemental (angle de la pollution atmosphérique). Dans la mesure où ce sont des systèmes nouveaux sur les territoires, ces critères ne peuvent être rédhibitoires dans un premier temps. En effet, la mise en place des TAD doit être considérée selon deux temporalités :

- à court ou moyen terme, lorsque les transports en commun classiques ne sont pas adaptés, on peut espérer que les TAD contribueront à amorcer un changement dans les comportements et les représentations des citoyens concernant leurs déplacements motorisés. Ainsi, un cercle vertueux pourrait s'enclencher entraînant l'augmentation progressive du nombre d'utilisateurs et de la qualité de ce service de transport.
- à long terme, on doit réduire les coûts (pris au sens très large) des déplacements liés aux besoins de la vie courante, des points de vue tant économique que social et environnemental.

A. Cas des lignes à déclenchement : moins coûteux, moins social

Les lignes à déclenchement (parfois considérées comme le niveau zéro de l'innovation en TAD¹⁰) remplacent souvent des lignes régulières de bus qui sont jugées peu rentables car peu utilisées, là où la demande est la plus diffuse sur le territoire : en périphérie des réseaux. En effet, ce sont bien souvent des zones où l'on voit des bus circuler avec un nombre très réduit de passagers, là où les densités de population sont souvent faibles. Dans ces secteurs géographiques, les lignes fixes ne sont certes pas toujours idéales pour répondre aux demandes en mobilité des populations en termes d'ubiquité, d'instantanéité et d'immédiateté (Dupuy, 1991). En particulier, les distances à parcourir pour rejoindre les arrêts et le temps de voyage avec le bus (qui ne déposera pas forcément les passagers à proximité de leur destination) ne permettent pas de concurrencer l'usage des VP, quitte à passer un peu de temps dans les embouteillages. En général, on considère que les usagers potentiels des transports publics ne les utilisent que si les arrêts/gares se trouvent à 400 mètres au maximum de leurs lieux de départ et de destination. Dans ce cas, proposer le même trajet, avec les mêmes arrêts et une fréquence bien moindre que celle des lignes régulières est probablement une solution

¹⁰ Déclaration de Didier Josselin dans « Réserver son bus à la carte », *Le Monde*, 21 octobre 2008.

économiquement rentable pour l'Autorité Organisatrice des Transports (AOT), mais n'encourage pas pour autant le report modal. De plus, la réservation nécessaire pour déclencher le départ du véhicule réduit l'usage aux seuls avertis et, contrairement à une ligne de bus classique, il ne peut y avoir de décision « impulsive » de l'utiliser.

Dans l'optique donnée par la LOTI de favoriser le « développement durable des territoires », l'aspect d'équité sociale d'accès aux transports est ici trop peu pris en compte. L'accessibilité est rendue plus difficile et donc sélective (voir « Les freins au développement des TAD » p. 78). Les coûts sont réduits pour l'exploitant mais les impacts sociaux sont plutôt négatifs car le service ne draine pas suffisamment le territoire.

B. Cas des TAD en porte-à-porte : un système idéal du point de vue social

À l'opposé des lignes à déclenchement, un système en porte-à-porte permet à tous les habitants du territoire desservi par le TAD, et aux personnes de passage, de se rendre où ils le souhaitent. L'objectif d'équité spatiale est pris en compte et, selon les choix de tarification, celui d'équité sociale également. En effet, les freins à l'utilisation du TAD agissent seulement sur l'ergonomie du système de réservation. Il s'agit alors d'établir une tarification incitative mais supportable par l'exploitant. Cependant, il est impossible de généraliser une conclusion quant aux coûts de ce type de TAD. Selon les cas, les distances parcourues seront plus importantes et la masse salariale devra être augmentée.

C. Cas des TAD mis en place pour évaluer les besoins sur un territoire

Parfois, les TAD sont envisagés comme un outil d'essai avant de pérenniser une ligne ou un réseau de transports en commun. C'est le cas lorsqu'une AOT projette de mettre en place, sur des territoires particulièrement pauvres en transports en commun, des systèmes de TAD durables. Si le service s'avérait être largement utilisé par la population, et que certaines récurrences fortes dans les déplacements apparaissaient, le TAD pourrait être précurseur d'une ou plusieurs lignes fixes et régulières qui seraient ainsi au plus proche des besoins et des pratiques de mobilité de la population. Selon les cas, cela ne serait efficace qu'à leur tour, les lignes régulières étaient développées en complémentarité avec le service de TAD et non en substitution complète (Banos, Izembard et Josselin, 2002).

Comme nous venons de le voir, le TAD est adaptable à diverses situations, transitoires ou pérennes. On peut ainsi envisager des TAD en marge de lignes régulières, dans les interstices temporels et spatiaux lorsque les lignes régulières ne sont ni efficaces ni pertinentes (le soir, pour un marché, le temps d'un événement, etc.). Il est donc possible de développer une très large palette de scénarios qui seraient économiquement supportables et socialement pertinents, mais il est primordial qu'ils soient adaptés aux besoins et enjeux particuliers des territoires. Il n'y a donc pas de système de TAD idéal qui pourraient être appliqué « clé en main » où que l'on soit, d'où leur grande variété.

D. Une évaluation environnementale complexe

Les impacts économiques et sociaux d'un TAD sont divers selon les lieux et les objectifs stratégiques réalisés. Malgré leur complexité, ils sont envisageables *a priori* de façon assez fiable, en extrapolant les connaissances acquises lors d'expériences antérieures. D'ailleurs, les projets de mobilité durable sont bien souvent pensés selon ces deux seuls aspects (économie et social) et la dimension environnementale n'est souvent mentionnée que de façon très générale, peut-être pour donner un côté « dans le vent », ou surtout pour s'inscrire dans les cadres légaux de développement durable et de protection de l'environnement imposés.

En étudiant ce paradoxe, on se rend compte rapidement que la dimension environnementale n'est pas analysée, parfois faute de réelle volonté, souvent par manque de moyens techniques pour prévoir et quantifier les impacts d'un TAD dans ce domaine. En effet, les phénomènes chimiques et physiques mis en jeu sont complexes et parfois mal connus ou instables. Cela rend difficile voire impossible une évaluation empirique. Il faut les modéliser et les quantifier lors de recherches en laboratoire, de simulations ou d'essais, complétés par des expérimentations *in situ*.

Dans notre étude, nous souhaitons pouvoir contribuer à statuer précisément sur la durabilité d'un système de TAD en l'abordant formellement du point de vue environnemental. Ceci d'autant plus que lorsqu'ils sont envisagés dans le cadre de PDU (Plan de Déplacement Urbain), les TAD doivent respecter six orientations légales parmi lesquelles sont inscrites « la diminution du trafic automobile et le développement des transports en commun » et « l'emploi de moyens plus économes et moins polluants ». Ces dispositions visent clairement à restreindre l'usage de la voiture personnelle au bénéfice des transports collectifs.

On se rappelle que l'un des enjeux des transports durables est le découplage relatif (au sens des économistes) des pratiques de mobilité et des impacts environnementaux (voir « Les différents

événements survenus au cours de l'Histoire ont été appréhendés par les scientifiques et savants toutes disciplines confondues, avec leur interprétation particulière des faits observés. C'est ainsi que selon le spécialiste du développement durable et de la discipline dans laquelle il exerce, l'acception même du concept est particulière. Et pour cause, l'interprétation par chaque discipline du développement durable implique des postulats de départ différents et de ce fait une historicité des questionnements variée.

L'approche de l'économiste (p. 29), en particulier les émissions de polluants. Cela rejoint une partie des objectifs des politiques locales (exemple des PDU en France).

Comme nous l'avons vu précédemment, les nuisances environnementales sont principalement liées au bruit, à la création de nouvelles infrastructures qui morcellent toujours un peu plus le territoire, et à la pollution atmosphérique. Les systèmes de TAD ne nécessitent l'installation d'aucune infrastructure particulière : ils utilisent des infrastructures déjà existantes. L'objectif des TAD étant de regrouper les voyageurs dans les véhicules, cela réduit mécaniquement le nombre de véhicules en circulation. Intuitivement, on est tenté d'avancer que les nuisances sonores et les émissions de polluants seront automatiquement réduites. Pourtant, la simple réduction du nombre de véhicules en circulation ne suffit pas pour affirmer que ces deux types de nuisances diminuent. Elles sont en effet toutes deux liées, au moins en partie, à la technologie des moteurs des véhicules choisis et aux conditions globales de mise en œuvre des services de TAD.

E. Des études sur l'impact environnemental des TAD

Rares sont les travaux qui évaluent les impacts des TAD en quantifiant les nuisances sonores et atmosphériques. Seuls (Diana, Quadrifoglio et Pronello, 2007) ont comparé les quantités de polluants émis par un système de TAD et celles émises par un système de lignes de bus classique sur un même territoire. Ils concluent que les économies faites grâce à un service de TAD viennent principalement de la nature (notamment la taille) des véhicules : des bus de 50 places pour le système classique de lignes fixes et des minibus pour le service de TAD. Ils observent en revanche que l'usage des TAD induit des distances parcourues significativement supérieures par rapport au service de bus.

Pour assurer la sauvegarde de la planète (OCDE – 1996), les systèmes de transports durables ne seront efficaces à long terme que si une part importante de la population les emprunte. L'objectif est donc d'inciter à un report modal du véhicule motorisé personnel vers des modes de transport plus collectifs. Il est donc nécessaire d'évaluer et de quantifier les gains effectués grâce à ces systèmes. Dans le cas de

TAD, il est essentiel d'identifier les seuils à partir desquels l'impact sur l'environnement est plus faible que celui inhérent à l'usage du véhicule particulier. D'une part, il est établi qu'une planification collective des déplacements est toujours plus économe en nombre de véhicules mobilisés qu'une planification réalisée par les individus eux-mêmes, mais d'autre part, cela implique de faire des détours par rapport aux chemins les plus directs pour prendre en charge d'autres usagers. En 2004, Houzet et Josselin indiquaient qu'un service de TAD, lorsqu'il atteint un fort taux de regroupement (équivalent ou supérieur à 3), permet de diminuer le nombre de véhicules sur les routes (jusqu'à 70 %) et par conséquent, le nombre de kilomètres parcourus en automobile (jusqu'à 30 % d'économie), ainsi que les émissions de polluants, à condition que la planification des déplacements soit collective et que les trajets soient optimisés. Ils indiquaient que les TAD peuvent contribuer à réduire les émissions de polluants liés aux déplacements des voyageurs (d'autant plus si les véhicules utilisés sont économes en carburant) et dans une certaine mesure la congestion urbaine (moins de véhicules sur les routes) (Castex, 2007). La thèse avançait également « [qu']un véhicule collectif en circulation (TAD) transportant deux personnes est [...] moins polluant que deux véhiculés individuels ». Cette affirmation est d'autant plus valable si les véhicules privés sont moins récents que le véhicule collectif. De plus, il a été démontré que les émissions de polluants sont plus importantes au démarrage et lors des 3 premiers kilomètres, que sur le reste du trajet (à partir du troisième kilomètre les rejets se stabilisent). Le gain effectué par le TAD qui roule en permanence par rapport aux véhicules privés lors du démarrage, peut ainsi compenser les pertes occasionnées par les détours.]

Cette analyse de la situation est tout à fait justifiée¹¹, mais elle est considérée dans le cadre d'un service optimal. En effet, les taxis attendent à la gare et le service étant effectué par une association de taxis, on ne connaît pas la localisation des dépôts, ni même l'emploi du temps des taxis en-dehors du service TAD. De fait, un élément important est oublié : le fait que les véhicules sont stockés dans des dépôts. Ils commencent donc leurs tournées à partir de ces dépôts avant d'aller chercher le premier usager. Cela implique inmanquablement des distances supplémentaires à parcourir, donc des émissions de polluants supplémentaires, par rapport à l'usage des VP. En outre, les distances parcourues par les VP ne prennent pas en compte les détours dus à la recherche d'un stationnement, qui est parfois éloigné de la destination, et les émissions de polluants qu'elle induit.

¹¹ Malgré une petite imprécision sur la distance moyenne à parcourir pour obtenir une température idéale pour la combustion du carburant établie à 6 km par Joumard *et al.* en 1999. Nous détaillons cet élément dans la partie « Intégration des surémissions au démarrage (E_{COLD}) » p.95

Nous avons établi une hiérarchie entre les différentes caractéristiques des systèmes de TAD, de bus et de l'utilisation des VP selon plusieurs critères indépendants. Le tableau qui suit (Tableau 2) propose une comparaison analytique de ces trois modes.

Tableau 2. Comparaison analytique des caractéristiques des systèmes de transport

	Caractéristiques du système de transport	VP	TAD	Bus
1	Capacité passagers / véhicules	≤ 5	≤ 20	≤ 50
2	Distances parcourues / véhicule	D_0	$D \geq D_0$	$D \geq D_0$
3	Temps de trajet / véhicule	T_0	$T \geq T_0$	$T \geq T_0$
4	Délais d'anticipation du déplacement	0	De 30 mn à 24 h	Selon cadencement des lignes
5	Flexibilité d'organisation du déplacement	Forte	De forte à faible selon le TAD	Moyenne/Forte
6	Intensité de la sensibilité à la congestion du trafic	Maximum	Diminue avec la part de report modal et le taux de regroupement et usage des voies réservées aux taxis	Minimale, surtout si en site propre
7	Coût en personnel	0	P_0	P_0
8	Rôle social et politique	Ségrégatif	Pour tous, selon la tarification appliquée et les modalités d'usage	Pour tous
9	Consommation de carburant/pollution rapportée au passager	C_0	$C > C_0$ selon les détours effectués, la localisation des dépôts, mais moins de démarrages par rapport aux VP.	$C > C_0$ type de véhicule, selon remplissage du véhicule.

avec C_0 et D_0 , valeurs minimales de référence

De 1 à 8, on peut empiriquement connaître les tendances, voire quantifier les différences entre les trois systèmes. Mais du point de vue de la consommation de carburant (9), les mécanismes en jeu sont multiples (taille du véhicule, type de carburant, vitesses pratiquées, distances parcourues). Comme nous l'avons vu, les distances parcourues par un TAD comprennent l'approche du véhicule depuis le dépôt, les trajets parcourus pour effectuer les courses auxquels on ajoute les détours hors du chemin le plus rapide pour la prise en charge de passagers supplémentaires. Cette complexité impose de procéder à des analyses plus poussées selon chaque cas précis. Il s'agit en particulier de déterminer l'impact de la forme des territoires habités, donc du réseau routier, sur les distances parcourues et les émissions de polluants qui leurs sont associées. Cela permettra de déterminer, en amont de la prise de décision, les conditions dans lesquelles il est plus intéressant, du point de vue des émissions de polluants, d'avoir recours à un TAD plutôt qu'à l'usage des véhicules personnels sur chaque territoire.

Chapitre 4 L'estimation des émissions de polluants par les véhicules à moteur thermique

« Il y a pollution de l'air lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses constituants est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, ou de créer une gêne. »

14 septembre 1967 - Conseil de l'Europe

En Europe, près d'un tiers de l'énergie globale est utilisée par les transports. Alors que dans certains domaines, l'utilisation de l'énergie se stabilise, pour les transports, elle ne cesse d'augmenter. En effet, les transports sont indispensables dans notre société moderne, dans laquelle on a toujours besoin d'aller plus vite, plus loin et être à deux endroits en même temps. Ces pratiques ne sont pas sans effets sur l'environnement, et donc sur la santé publique, car elles se traduisent principalement par l'émission de gaz et substances polluantes dans l'atmosphère direct. L'estimation de ces émissions devient alors un enjeu primordial dès qu'il est question de transports, que ce soit en milieu urbain ou rural. Le diagnostic environnemental des TAD est nécessaire pour dépasser les idées préconçues. Les émissions de polluants liées au TAD dépendent de nombreux paramètres et sont ainsi très variables selon les conditions de circulation.

Les émissions de polluants par les transports routiers sont directement liées à la consommation de carburant par les moteurs thermiques qui équipent les véhicules actuels. Elles sont la conséquence de la combustion souvent incomplète du carburant (essence, diesel). Les différents gaz et substances ainsi rejetés dans l'atmosphère participent pour certains à la pollution atmosphérique des villes, d'autres sont impliqués dans le phénomène d'effet de serre.

Nous présenterons en premier lieu les mécanismes de création des polluants dans les moteurs thermiques pour ensuite exposer les paramètres qui provoquent des variations de quantité de polluants émis par les véhicules. Nous décrivons ensuite les différentes approches envisageables de modélisation de ces paramètres et enfin, nous détaillons deux approches de modélisation issues du projet européen COPERT.

1. Mécanismes en jeu dans la création des polluants par les moteurs

Les émissions de polluants par les automobiles sont provoquées par la combustion du carburant dans les moteurs à explosion des véhicules. Différentes études ont mis en évidence les paramètres qui jouent sur la consommation de carburant (donc sur la quantité de polluants émise) par les

véhicules ainsi que des situations favorables à une augmentation temporaire de la consommation (surémission de polluants). Les éléments qui influent sur les émissions de polluants en sont déduits directement.

A. Des réactions chimiques à l'origine des polluants

La pollution provoquée par l'utilisation d'un moteur à explosion interne, comme dans un véhicule automobile, est directement liée à la combustion d'un carburant pétrochimique. Celui-ci est composé de longues chaînes hydrocarbonnées qui, sous l'effet de la chaleur ou lors d'autres réactions chimiques qui surviennent dans la chambre de combustion, peuvent se transformer en molécules cycliques. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) présentent une alternance de liaisons double/simple. La forme cyclique de la molécule provoque une délocalisation des doubles liaisons ce qui rend les molécules très réactives. Cela augmente la possibilité de voir apparaître des réactions chimiques et des hétéroatomes (atomes différents du carbone présents dans le carburant) peuvent s'y adjoindre. Ceux-ci participent ainsi pour bonne part à la pollution (Degobert, 1992).

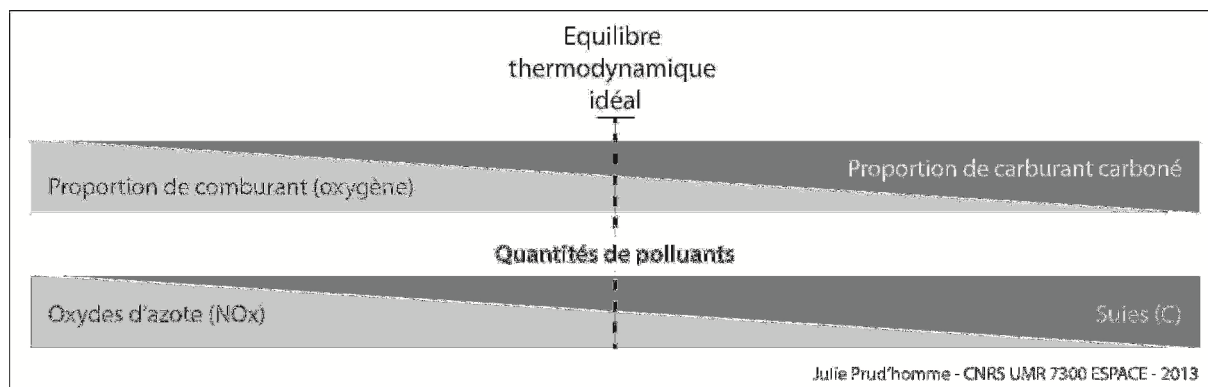
Une combustion ne peut se dérouler qu'en présence d'un carburant, d'un comburant et d'une source d'énergie (une étincelle de la bougie pour l'essence, la compression pour le diesel). Dans un cas idéal, le carburant est pur, composé de carbone et d'hydrogène. Celui-ci est brûlé grâce à la présence d'oxygène ce qui peut provoquer la création de suies, des particules de charbon également appelées microparticules (PM). Ceci est une pollution physique. Dans un cas réel, le carburant n'est pas pur. Il est en effet composé de carbone et d'hydrogène mais d'autres substances qui sont apportées par des additifs en tous genres sont présentes. Le comburant est l'air atmosphérique qui est composé de dioxygène (O_2) à « seulement » 20,9% ; 78% de diazote (N_2) ; 0,9% d'argon (Ar) et le reste est un mélange divers de gaz dont 0,038% de CO_2 . L'azote (N) est un agent neutre à basse température, mais à haute température, il devient réactif. Or la température moyenne dans un moteur à explosion est proche de 1 000°C. Des combinaisons de diazote et de dioxygène se créent alors et forment des oxydes d'azote :

$$(N_2 + O_2 \Rightarrow NO_x).$$

En définitive, comme l'illustre le schéma suivant (Figure 11), une combustion durant laquelle on a une trop forte proportion de carburant carboné produit plus de suies alors qu'une combustion en présence d'une trop forte proportion de comburant (oxygène) produit plus d'oxydes. Il s'agit donc de doser en bonnes proportions l'apport en comburant par rapport à la quantité de carburant et ainsi approcher **l'équilibre thermodynamique idéal**. La formation de monoxyde de carbone (CO)

intervient avant le processus d'oxydation des hydrocarbures conduisant au dioxyde de carbone (CO_2) au cours d'une réaction en chaîne impliquant un apport important d'oxygène (O).

Figure 11. Proportions de carburant/comburant et polluants



La durée très faible laissée aux processus de combustion pour s'accomplir au sein des chambres de combustion du moteur, les défauts d'homogénéité des mélanges carburés, l'hétérogénéité des températures et leurs variations rapides ne permettent jamais d'atteindre l'équilibre thermochimique idéal et entraîne la présence à l'échappement de produits de combustion incomplète (Degobert, 1992).

Concrètement, à chaque fois que le conducteur appuie sur l'accélérateur, il apporte du carburant au moteur. Il y a donc une augmentation de la quantité de carburant à l'instant $t+1$ par rapport à l'instant t . Cela entraîne une augmentation de la quantité de polluants émise qui est liée au temps de réaction nécessaire pour que le moteur se mette à tourner plus vite, donc une période où le moteur est suralimenté en carburant. En revanche, plus le régime moteur est bas, moins il consomme. Il fournit alors moins de puissance. Lorsque le véhicule dépasse les 90 km/h, le rapport de vitesse employé est bien souvent la cinquième et le moteur est utilisé en surrégime. D'autre part, avec la vitesse, les frottements de l'air sont plus importants. Pour avancer, le véhicule a donc besoin de plus de puissance, donc de carburant.

En dessous de 50 km/h, la consommation est plus importante qu'à 60 km/h et donc les émissions de polluants. Cet état de fait est dû au couple déployé selon les rapports de vitesse employés. En effet, en dessous de 50 km/h le conducteur reste généralement en surrégime en 3^e ou à régime moyen en 4^e mais très rarement en sous-régime en 5^e, surtout s'il se trouve dans un contexte urbain où il a besoin d'avoir une certaine réactivité du véhicule (donc du couple).

Il existe également des émissions de polluant par évaporation. Selon (Hickman *et al.*, 2003), des vapeurs de carburant sont émises chaque fois que le réservoir est rempli et la croissance quotidienne de la température provoque la dilatation des vapeurs qui sont expulsées du réservoir. De la vapeur est créée chaque fois que le carburant se trouve en contact avec l'air, en particulier lorsque le véhicule est chaud durant ou après son utilisation. En conséquence, il existe différents facteurs d'émission, dépendant du type d'émission par évaporation. En général, ces facteurs sont fonction de la température ambiante et de la volatilité du carburant. Leur estimation nécessite un nombre important de données concernant l'activité du véhicule (dont la distance totale parcourue, le nombre de voyages effectués, la température du moteur à la fin du trajet). Celles-ci ne sont pas toujours évidentes à connaître.

B. Paramètres impliqués dans la variation des quantités de polluants émises

Les émissions de polluants sont donc la conséquence directe de la consommation de carburant par le véhicule. Les polluants sont créés et émis dans des quantités variables. Des paramètres liés aux véhicules et d'autres aux conditions de circulation rentrent en compte. Outre la technologie des véhicules et la vitesse moyenne, d'autres paramètres affectent les émissions, soit directement (par exemple, le kilométrage du véhicule, la température du moteur, l'altitude – les concentrations en O₂ sont inférieures), soit en altérant le mode de fonctionnement du moteur (par exemple : la déclivité de la route, la charge du véhicule) (Hickman *et al.*, 2003). Nous les détaillons ici :

Critères liés aux véhicules :

- le type de véhicule et de motorisation, le poids du véhicule impliquant une demande de puissance et donc une consommation supplémentaire (plus un véhicule est lourd, plus il consomme) ;
- l'âge du véhicule implique une usure de certaines pièces du moteur, son encrassement qui altèrent la qualité de la combustion ;
- le type de carburant (essence, gasoil, GPL, etc.) utilisé qui correspond d'une part à différentes compositions en hydrocarbures, et ainsi des rejets et d'autre part, à une technologie de moteur différente ;
- l'utilisation des auxiliaires (phares, ventilation cabine, climatisation, radio,...) crée une demande énergétique supplémentaire.

Critères liés à la circulation :

- les distances parcourues ;

- les vitesses de circulation et régimes moteurs appliqués ;
- le type de conduite, intensité des accélérations (lié au comportement du conducteur sur la route). Plus l'intensité est faible, donc une accélération douce et progressive, plus le moteur a le temps de rééquilibrer la combustion (part de comburant/carburant). Ces éléments sont repris dans les conseils d'« écoconduite ». Les accélérations et décélérations, donc toute modification de la vitesse de la circulation, provoquent une surconsommation, donc une surémission, qui dépend du facteur d'accélération. Il est entendu qu'une accélération/décélération de $\pm 0,5 \text{ m.s}^{-1}$ correspond à une conduite « tranquille », et qu'une variation de $\pm 0,8 \text{ m.s}^{-1}$ à une conduite « sportive » ou « agressive » plus gourmande en carburant ;
- la congestion des routes, qui implique un rythme de conduite saccadé, des vitesses réduites.

Les deux derniers paramètres sont des aspects de cinétique, relatifs aux mouvements des véhicules (au sens physique du terme).

La présence de systèmes antipollution (pots catalytiques – véhicules essence, filtres à microparticules – véhicules diesel) permet de réduire les quantités de rejets néfastes dans l'atmosphère une fois leur température normale de fonctionnement atteinte.

La température du moteur

Un critère primordial des émissions de polluants, la température du moteur, est autant lié aux principes de combustion dans les moteurs qu'à des paramètres de circulation. La température, celle de la chambre de combustion notamment, est un élément majeur de la qualité de la combustion. Elle dépend également de la température de l'environnement et provoque le rejet des différents polluants en quantités différentes. On distingue ainsi :

- les **émissions à chaud** qui sont produites quand le moteur et les systèmes antipollution des véhicules **ont atteint** leur température normale de fonctionnement ;
- les **émissions à froid** (ou surémissions à froid) qui sont produites quand le moteur et les systèmes antipollution **n'ont pas encore atteint** leur température normale de fonctionnement. Elles sont liées à la distance parcourue et à la température ambiante. En effet, les émissions d'un véhicule se stabilisent seulement quand le moteur est complètement chaud et pour ce faire, il est nécessaire qu'il ait fonctionné un certain temps (la « distance parcourue à froid »). Cette distance varie selon le type de véhicule, la façon dont la voiture

est conduite, la température ambiante et le polluant concerné. Les surémissions sont produites durant la totalité de la distance parcourue à froid. De plus, en général, les surémissions tendent à augmenter quand la température de départ est basse.

Les émissions produites au cours d'un trajet sont donc liées à de nombreux paramètres indépendants les uns des autres. Ceux-ci sont intégrés dans certains des modèles d'estimation des émissions de polluants.

2. Différentes modélisations des émissions de polluants

Des modèles d'émission de polluants par les véhicules existent. Ils sont adaptés à l'analyse agrégée des émissions produites par la circulation d'une flotte de véhicules personnels et de poids-lourds au sein d'un territoire donné.

Nous présentons ici les modèles à partir desquels nous avons travaillé.

Depuis 1985, le programme européen COPERT (COmputer Program to calculate Emission from Road Transport) a pour but de mettre au point un modèle d'estimation des émissions de polluants par les différents types de véhicules, implémenté dans les logiciels COPERT (I à IV). Le développement de COPERT est coordonné et financé par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), dans le cadre des activités du Centre thématique européen pour la pollution de l'air et de l'atténuation des changements climatiques (Agence européenne pour l'environnement, 2012).

Il a été alimenté par les résultats de différents programmes de recherche de toute l'Europe. Les travaux du projet de recherche MEET (Methodology for Estimating air pollutant Emissions from Transports) a notamment contribué à l'élaboration de COPERT III (2000). La version actuelle, COPERT IV, a été complétée avec une synthèse de résultats du projet ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) qui propose des facteurs d'émission dépendant des caractéristiques de circulation.

Tous ces travaux sont disponibles et mobilisables pour des applications scientifiques et universitaires.

Une première modélisation du rapport entre vitesse de circulation et émission de polluants a été proposée en 1987. Progressivement, le modèle a été enrichi :

- Études du comportement des émissions de polluants lors du démarrage (Joumard *et al.*, 1995) qui ont démontré que tous les polluants n'ont pas le même comportement dans cette situation. En effet, on n'observe pas de « sur-pollution » pour tous les polluants lors de cette période à froid. Seuls NO_x et N₂O connaissent une « sous-émission » faible, que ce soit avec des véhicules essence ou diesel. Il est établi qu'une distance proche de 6 km est nécessaire pour atteindre la température idéale pour la combustion du carburant, bien que toutes les émissions de polluants ne se stabilisent pas au même moment.
- Mise en évidence de l'impact des accélérations (Joumard, Philippe et Vidon, 1999).
- Étude de la sensibilité des émissions de polluants aux vitesses de circulation par André et Hammarström, dans le cadre du projet MEET diffusé en 1999 (Hickman *et al.*, 1999).
- Analyses de l'influence des « cycles de conduite » sur ces émissions effectuées en complément (Joumard *et al.*, 2000). Les cycles de conduite sont conçus pour être représentatifs des trajets dans des conditions de circulation particulières. Ils intègrent le démarrage du moteur, une phase de roulage et la coupure du moteur pour la mesure des émissions de polluants. Ils prennent ainsi en compte un certain nombre de paramètres comme la vitesse (maximum, moyenne...), la distance, la température ambiante, etc. Les différentes études ont mis en évidence l'importance du parcours à froid et des paramètres cinétiques dans les estimations de polluants.
- Précision de l'influence des caractéristiques des routes (sinuosité, nature des intersections), des performances des véhicules et du style de conduite des conducteurs sur les émissions de polluants (Brundell-Freij et Ericsson, 2005). Il s'est avéré que l'environnement des routes (occurrence et densité des croisements contrôlés par des feux tricolores, les limitations de vitesse, la fonction de la route et le type de voisinage) ont une importance non négligeable sur les comportements de conduite. Leur impact sur la pollution est lié à la répétition des accélérations.
- D'autres travaux s'appliquent à estimer les impacts atmosphériques des situations de congestion (Chanut et Chevallier, 2011).

Ces différents paramètres ont été intégrés à la modélisation numérique des émissions de polluants par la circulation routière. Certains sont mobilisés dans le cadre de notre modélisation spatiale des émissions de polluants émises par les TAD.

A. Estimation des quantités de polluants émises : différentes approches à différents niveaux de précision

La synthèse du projet COPERT (Ntziachristos et Samaras, 2009) détaille trois approches envisageables dans l'estimation des émissions de polluants. Le choix de l'approche par le technicien se fait selon les données disponibles. Dans le Tableau 3, nous présentons les différentes approches envisageables pour l'estimation des quantités d'émissions produites. L'approche 3 est employée dans les programmes MEET et COPERT. Tous deux sont détaillés dans la partie qui suit.

Tableau 3. Trois approches possibles pour le calcul des émissions de polluants

	Approche 1 : basée sur la consommation en carburant	Approche 2 : basée sur les distances parcourues	Approche 3 : basée sur les caractéristiques des véhicules et leur activité
Échelle d'application	Territoire large, à l'année	Territoire large, à l'année	Territoire du large au très fin (échelle d'une rue), à l'année
Données en entrée	Consommation totale de carburant	Estimation de la distance moyenne parcourue par chaque type de véhicule	<i>Données sur l'activité des véhicules :</i> distances moyennes parcourues, vitesse moyenne pratiquée, température ambiante
	Composition du parc automobile	Composition du parc automobile	<i>Données techniques :</i> caractéristiques des véhicules
Informations complémentaires	Consommation moyenne de chaque type de véhicule (l/km) et facteur d'émission associé (g/km)	Facteur d'émission correspondant à chaque type de véhicule (g/km)	Facteur d'émission correspondant à chaque type de véhicule (g/km)
			Surémission au démarrage (g)
Méthode	Distribution de la consommation totale selon le type de véhicules	Pondération des distances par les facteurs d'émission	Pondération des facteurs d'émission par les données sur l'activité des véhicules
			Addition des émissions « à chaud » et des émissions « à froid »

B. Des programmes européens pour la création d'un modèle d'émission toujours plus précis

Dans ce cadre, deux modèles « macroscopiques » ont été développés. Un premier en 1999 (MEET, associé à COPERT III) et un second publié en 2009 (COPERT IV). Basés tout deux sur la même approche, le second propose des profils d'émission moyens selon le contexte de circulation (zones urbaine, rurale et situation autoroutière).

La méthodologie MEET est basée sur trois types d'émissions :

- les émissions à chaud - E_{HOT} ;
- les émissions au démarrage - E_{COLD} ;
- les émissions par évaporation - E_{EVAP} .

Ils permettent de calculer l'émission totale (E_T) :

$$E_T = E_{HOT} + E_{COLD} + E_{EVAP}$$

Dans le modèle COPERT, ces émissions à l'évaporation ne sont pas prises en compte. Nous ne les détaillons donc pas ici.

Contrairement à MEET, COPERT prévoit explicitement le calcul des émissions produites dans trois contextes différents : urbain, rural, autoroutier.

$$E_T = E_{T\text{ URBAIN}} + E_{T\text{ RURAL}} + E_{T\text{ AUTOROUTE}}$$

Nous précisons ci-dessous chacun des deux modèles. Nous ne présentons que les cas des véhicules légers et minibus.

a. *MEET*

- Calcul des émissions en circulation (E_{HOT})

Les émissions à chaud regroupent différents polluants.

$$E_{HOT} = \sum E_k$$

où

E_k : la quantité du polluant k émise.

Le modèle prévoit le calcul des émissions propres à chaque polluant. L'équation intègre les données suivantes :

- le nombre de véhicules dans chaque catégorie,
- la distance annuelle totale parcourue par chaque catégorie de véhicule,
- le pourcentage de la distance parcourue sur des routes rurales, urbaines et sur des autoroutes,
- la vitesse moyenne sur chaque type de route,
- le facteur d'émission - corrélation de la vitesse moyenne.

$$E_k = \sum_{i=1} n_i \cdot l_i \times \sum_{j=1} p_{i,j} \cdot e_{i,j,k}$$

où,

k : le polluant,

i : la catégorie du véhicule,

j : le type de route, résumé par la vitesse moyenne pratiquée sur ce type de routes,

n_i : le nombre de véhicules dans la catégorie i ,

l_i : la distance annuelle moyenne parcourue par les véhicules de la catégorie i ,

$p_{i,j}$: le pourcentage de la distance annuelle parcourue sur le type de route j , pour le type de véhicule i ,

$e_{i,j,k}$: le facteur d'émission du polluant k correspondant à la vitesse moyenne sur le type de route j , pour la catégorie de véhicule i .

Les facteurs d'émission ($e_{i,k}$), selon le carburant, le type de véhicule pour chaque polluant, sont fonction de la vitesse (V), et de la forme :

$$e_{i,k} = a + b.V + c.V^2$$

avec a, b, c des constantes.

- Intégration des surémissions au démarrage (E_{COLD})

La méthode proposée par MEET pour estimer les émissions de démarrage a été développée empiriquement, en utilisant des données issues de plusieurs programmes européens de test. Selon la méthodologie MEET, pour chaque polluant et chaque type de véhicule, une valeur de référence est définie pour la surémission : c'est la valeur correspondant à un démarrage à 20°C et une vitesse moyenne de 20 km/h (Hickman *et al. op.cit.*).

Les émissions de démarrage, parce qu'elles se produisent seulement dans la première partie d'un voyage, sont exprimées comme une quantité de polluant produite par trajet, et ne dépend pas de la distance parcourue. Le facteur d'émission est calculé comme une fonction de la vitesse moyenne, la température ambiante, la longueur du trajet et la longueur du trajet parcouru « à froid » qui est de 6 km environ (Hickman *et al. op.cit.* (Joumard *et al.*, 1995). Plus le moteur est chaud, moins les émissions de démarrage sont importantes. Les émissions de démarrage à froid sont considérées comme une constante (consommation en excès lors d'un démarrage à froid). Elles sont estimée à partir d'une valeur de référence mesurée à 20 km/h, dans un environnement à 20°C (ω). Celle-ci est corrigée par la vitesse moyenne pratiquée durant cette période ($f(V)$) et par la température ambiante mesurée ($g(T)$).

$$E_{COLD} = \omega \times [f(V) + g(T) - 1] \times h(d)$$

où,

ω : la surémission de référence (à 20°C et 20 Km/h)

V : la vitesse moyenne en km/h pendant la période froide,

T : la température en degré °C (la température ambiante pour un départ à froid, la température du moteur à froid pour des démarrages à une température intermédiaire)

d : la distance parcourue

$h(d)$ est un correcteur de la distance si le trajet est plus court que la distance nécessaire pour que le moteur atteigne la température idéale

$f(V)$ est le correcteur de la constante de référence par la vitesse moyenne selon le type de véhicule

et le type de carburant, de la forme $f(V) = a V + b$.

$g(T)$ est le correcteur de la constante de référence par la température ambiante selon le type de

véhicule et le type de carburant, de la forme $g(T) = a T + b$.

b. COPERT IV

COPERT IV repose sur les mêmes principes que MEET. Il y ajoute l'intégration de résultats du projet ARTEMIS en proposant des profils moyens d'émission selon le contexte. Ceux-ci considèrent une vitesse moyenne représentative des conditions réelles pour chaque profil. Ils intègrent également des accélérations moyennes plus ou moins importantes selon le profil. COPERT apporte également une quantification des effets de l'âge des véhicules sur les émissions de polluants.

Selon le cas, les surémissions au démarrage sont plus ou moins prises en compte. En zone urbaine, elles sont considérées comme importantes du fait de la configuration des trajets en zone urbaine (faibles vitesses après le démarrage qui ne permettent pas un réchauffement rapide du moteur). Les situations de démarrage du moteur (froid) quelques instants avant d'emprunter une autoroute étant très rares, le profil ne considère aucune surémission à froid dans ce contexte. Le tableau qui suit présente les paramètres majeurs des profils.

Tableau 4 : Comparaison des profils de circulation intégrés dans COPERT IV
établi à partir de (Ntziachristos et al., 2009)

	Urbain	Rural	Autoroutier
Vitesse moyenne (km/h)	20	60	100
Émissions au démarrage	importantes	faibles	nulles
Facteur d'émission de microparticules (g/km) <i>Cas des véhicules légers essence EURO 3 et 4</i>	1.28 .10 ⁻³	8.36 .10 ⁻⁴	1.19 .10 ⁻³

- Calcul des émissions en circulation (E_{HOT})

Remarque : les notations ne sont pas identiques entre les documents expliquant les deux versions du modèle. Pour une meilleure compréhension, nous décidons ici de les uniformiser en prenant comme référence le modèle MEET.

Les émissions en circulation sont calculées selon le type des véhicules, selon le type de routes (profil) et selon les distances parcourues (Ntziachristos et Samaras, 2009).

$$E_{HOT;k,i,j} = N_i \times M_{i,j} \times e_{HOT;k,i,j}$$

où,

$E_{HOT;k,i,j}$: les émissions du polluant k (g), produites par les véhicules de type i , circulant sur des routes de type j ,

N_i : le nombre de véhicule de type i en circulation,

$M_{i,j}$: la distance parcourue par chaque véhicule de type i sur des routes de type j ,

$e_{HOT;k,i,j}$: le facteur d'émission (g/km) pour le polluant k , provenant des véhicules de type i circulant sur des routes de type j .

Les facteurs d'émissions, autant pour les véhicules essence que diesel, sont de la forme :

$$e_{HOT;k,i,j} = (a + c \times V + e \times V^2) / (1 + b \times V + d \times V^2)$$

avec a, b, c, d, e des constantes.

- Intégration des surémissions au démarrage (E_{COLD})

Dans COPERT IV, les émissions lors des démarrages à froid sont introduites dans les calculs en tant qu'émissions supplémentaires par km selon la formule suivante :

$$E_{COLD;k,i} = \beta_{k,i} \times N_i \times M_i \times e_{HOT;k,i} \times (e_{COLD}/e_{HOT;k,i} - 1)$$

où,

$E_{COLD;k,i}$: émission du polluant k (pour l'année de référence) produit par la technologie de véhicule i ,

$\beta_{k,i}$: fraction de la distance totale parcourue avec un moteur froid ou un pot catalytique en-dessous de sa température seuil pour le polluant k et la technologie de véhicule i ,

N_i : nombre de véhicules de technologie i en circulation,

M_i : kilométrage total pour la technologie de véhicules i ,

$e_{COLD}/e_{HOT;k,i}$: quotient d'émission froid/chaud pour le polluant k et les véhicules de technologie i .

Le paramètre β dépend de la température ambiante t_a (pour des raisons pratiques la température mensuelle moyenne peut être utilisée), et du schéma d'utilisation du véhicule – en particulier la longueur moyenne de trajet (Ntziachristos *et al. op.cit.*).

La méthode proposée avec COPERT IV doit permettre d'effectuer des estimations à l'échelle d'une rue. Toutefois, la qualité des données nécessaires pour avoir des estimations précises à ce niveau de précision freine grandement une telle utilisation pour le moment.

Il existe par ailleurs des modèles météorologiques basés sur des réseaux de capteurs distribués dans l'espace géographique. Ils sont notamment utilisés pour informer les conducteurs sur les vitesses appropriées (par exemple sur autoroute) pour réduire les émissions de polluants lors des pics de chaleur estivale (Malherbe et Rouil, 2003). Ces modèles interviennent à une échelle intermédiaire puisqu'ils sont basés sur les conditions météorologiques locales et de trafic. Ils interpolent les niveaux de pollution observés. Toutefois, la faible densité de mesures conjuguée à des méthodes d'interpolation qui peinent à prendre en compte les facteurs locaux (morphologie urbaine) peut générer des erreurs de prédiction. Ainsi, un des enjeux majeurs est d'établir une relation fiable entre les polluants effectivement présents dans l'air et les sources qui les produisent. Bien qu'intéressante et prometteuse, la combinaison de ces deux types de modèles ne permet pas d'estimer les émissions de polluants à une résolution spatiale suffisamment fine. Au-delà du diagnostic de pollution, il convient de rechercher les causalités, plus particulièrement l'impact de la structure des réseaux. De

fait, il reste très difficile d'évaluer l'impact des déplacements réels, en incluant les vitesses, les accélérations et décélérations des véhicules, dont on connaît l'impact déterminant sur les émissions.

Nous constatons que les modèles existants, tels que ceux que nous venons de présenter, se positionnent majoritairement à une échelle macroscopique (spatiale et temporelle). Ceux qui se situent à une échelle plus fine sont plutôt orientés vers la modélisation des flux de véhicules (modèle VERSIT+ (Smit, Smokers et Rabé, 2007)). Ils sont en effet basés sur des moyennes annuelles de distances parcourues à des vitesses moyennes à partir de sondages faits sur le terrain ou auprès de la population. La méthodologie COPERT en est une illustration. Cette méthode est basée sur la vitesse moyenne et, bien que les cycles qui permettent de déterminer les facteurs d'émissions sont censés être représentatifs des conditions réelles, une telle approche est insuffisante lorsque l'on souhaite discrétiser chaque déplacement sur un réseau routier donné, comme nous souhaitons pour analyser le cas des TAD.

Si le rôle du réseau routier est indéniable dans les émissions de polluants, il n'est pas pris explicitement en compte dans les modèles. En effet, comme nous venons de le détailler, vitesses, distances et démarrages à froid sont des paramètres majeurs dans l'émission de polluants par les véhicules. Or il est clair qu'ils sont directement corrélés aux caractéristiques du réseau routier, tant dans sa structure que dans son fonctionnement, sa réglementation. D'une part, la forme du réseau routier et les vitesses appliquées sur chaque tronçon conditionnent fortement les plus courts chemins en temps et en distance. D'autre part, la forme du réseau routier (nombre d'intersections) et la forme des routes (sinuosité) influent directement sur le rythme de la conduite et donc sur les accélérations/décélérations. Le réseau routier par sa morphologie et son fonctionnement joue donc un rôle presque actif dans la production d'émissions de polluants par les véhicules automobiles. Plus qu'un simple support, il peut être considéré comme un paramètre à part entière dans l'estimation des quantités de polluants émises par ces mêmes véhicules.

Synthèse de la Partie I

Dans le contexte actuel de développement durable, les transports à la demande sont souvent présentés, au moins implicitement, comme des systèmes de transport durables. Pourtant, les impacts environnementaux de ce mode de transport n'ont été que très peu étudiés. Aucune recherche n'a jusqu'à présent porté sur les émissions de polluants potentiellement économisées avec l'utilisation d'un TAD plutôt qu'avec les véhicules personnels. Des modèles d'estimation des quantités de polluants émises par les véhicules motorisés existent et sont adaptés pour effectuer un diagnostic global sur un territoire donné des émissions de polluants inhérentes à la circulation automobile. Ils ne conviennent cependant pas à la modélisation du fonctionnement particulier des TAD dont le fonctionnement nécessite un travail à une échelle d'analyse plus fine. Étant donné que la production et l'émission de polluants par les véhicules sont directement liées aux caractéristiques fonctionnelles et structurelles des réseaux routiers, les impacts d'un même système de TAD, du point de vue des émissions de polluants, peuvent varier selon les réseaux routiers.

Un système de transport répond à une demande de déplacements qui s'inscrit dans l'espace et dans le temps. Le réseau sur lequel il est mis en place contraint et conditionne son fonctionnement. Pour se rapprocher de l'idéal, le système de transport peut être optimisé selon les distances parcourues et les durées de voyage. Ces deux paramètres dépendent des caractéristiques du réseau sur lequel le système est employé mais aussi de la configuration spatio-temporelle de la demande de déplacements qui peut être dépendante de l'organisation spatiale des aménités sur le territoire. Évaluer l'influence de ces deux paramètres sur les performances du système de transport peut permettre de préciser l'évaluation de ses performances environnementales.

Nous nous interrogeons sur les quantités de polluants émises par un service de TAD selon d'une part la forme du réseau routier et d'autre part la répartition de la demande sur le territoire concerné. Très globalement, nous nous demandons si l'optimisation d'un même type de TAD est équivalente selon le réseau routier et selon la structure spatio-temporelle de demande. Dans quelle mesure les caractéristiques des réseaux influent-elles sur les performances environnementales des TAD ? Quelles sont les caractéristiques des TAD qui permettent des répondre au mieux aux demandes de déplacement sur un territoire donné ? Et selon quelles spécificités structurelles de la demande ?

Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, il nous paraît nécessaire de travailler à l'échelle du tronçon de route. Nous mettons donc en place une démarche mobilisant des logiciels existants et des outils développés spécifiquement qui nous permet d'estimer les émissions de

polluants inhérentes à la circulation des véhicules sur chaque tronçon de route emprunté. Avec cet outil, nous devons être en capacité d'identifier et de quantifier les seuils à partir desquels les TAD seraient plus profitables que l'usage des véhicules personnels du point de vue des quantités de polluants rejetées dans l'atmosphère, tout en proposant une qualité de service compétitive.

Partie II.

**Prendre en compte les composantes
techniques et géographiques des systèmes
de transport pour mieux évaluer les
émissions**

Introduction

Les analyses des modèles d'émission ont mis en évidence la prépondérance sémantique du réseau routier réseau qui n'est pas prise en compte. En effet, distance, vitesse et éléments cinétiques sont directement liés au réseau routier. Le réseau est dès lors plus qu'un simple support, il est un paramètre à part entière qui influe sur les quantités de polluants émis par les automobiles et sur leur localisation sur le réseau. Il paraît ainsi pertinent de déterminer dans quelle mesure le réseau, dans son fonctionnement et sa morphologie, influe sur les émissions produites par la circulation automobile. À cela s'ajoutent les caractéristiques de configuration spatio-temporelle des déplacements et les paramètres d'optimisation de la réponse aux demandes de déplacement par les systèmes de transports à la demande (TAD). Ces derniers éléments peuvent sensiblement influencer sur les distances parcourues. Pour évaluer leurs impacts sur les émissions de polluants, nous avons besoin de calculer les émissions à l'échelle des tronçons de route. Nous avons donc besoin de connaître le chemin exact qui est emprunté par les automobiles. Pour cela, un modèle d'estimation des quantités de polluant émises est développé (GREEN-DRT), couplé à une méthode de modélisation des parcours des véhicules sur le réseau routier. Nous avons ainsi élaboré une méthode qui nous permet de connaître les quantités de polluants émises par un service de transport sur chaque tronçon du réseau routier, c'est à dire chaque portion de route située entre deux intersections.

Nous présentons dans un premier temps les leviers d'action structurels disponibles pour optimiser les performances des systèmes de transport. Nous détaillons ensuite le modèle d'émission spécifiquement développé (GREEN-DRT) pour pouvoir prendre en compte les différents paramètres structurels identifiés. Nous présentons enfin la méthodologie employée pour évaluer l'impact des différents éléments sur les performances autant environnementales que du point de vue du service de transport.

La méthodologie est adaptée au fonctionnement complexe des TAD point à point dont les tournées sont calculées à la volée. Elle est facilement ajustable à d'autres systèmes de transports routiers.

Chapitre 5 Des leviers d'action structurels pour optimiser les performances environnementales des TAD

Les déplacements répondent à des besoins de mobilité avec des objectifs qui peuvent être multiples. Ils s'inscrivent dans l'espace par un lieu de départ et un lieu d'arrivée et suivent le réseau routier en place, élément contraignant pour tout déplacement. Ces deux éléments influent nécessairement sur l'optimisation des tournées de TAD.

1. La configuration spatio-temporelle de la demande

Les besoins en mobilité des individus impliquent des déplacements liés aux différentes activités pratiquées ou recherchées. Les origine et destination des déplacements sont spatialement contraintes par la localisation des centres d'attraction et/ou d'émission (domiciles, emplois, différentes aménités). Les déplacements se situent également dans le temps. Il est donc nécessaire de considérer les différentes échelles spatiales et temporelles des mobilités. Des mobilités de tourisme concernent généralement des distances plus longues, avec peu de contraintes temporelles alors que les mobilités quotidiennes de travail, ou navettes domicile-travail, sont plus contraintes quant aux horaires, avec des distances parcourues plus courtes.

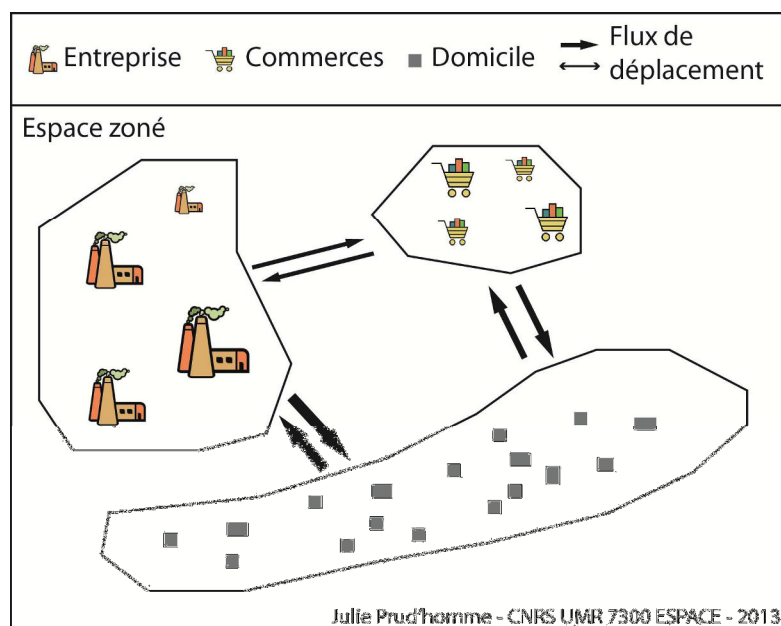
Dans ce travail, nous nous intéressons exclusivement aux mobilités locales. Un service de transport collectif urbain s'inscrit dans un territoire limité, en premier lieu pour répondre aux besoins de mobilité de la population locale, pour des déplacements au sein d'un bassin de vie plus ou moins large. Nous détaillons ici les impacts des dimensions spatiale et temporelle des besoins sur les caractéristiques des flux de déplacements. Nous présentons des exemples « types » de structures spatiales et temporelles des déplacements, volontairement exagérés pour mettre en évidence les particularités de chacun.

A. Des configurations spatiales

Les caractéristiques spatiales sont directement liées à la localisation des activités sur le territoire. En ne considérant que les déplacements entre domicile, travail et commerces, nous distinguons trois

types d'organisation de l'espace urbanisé : l'espace zoné (*zonage*¹²) ; l'espace polarisé – aires urbaines fonctionnelles ; l'espace apolarisé. Chacun implique des concentrations spatiales de flux différentes, alors que certains ont un potentiel de regroupement important (espaces zonés), d'autres sont caractérisés par des flux plus diffus dans l'espace, moins évidents à regrouper (espaces apolarisés).

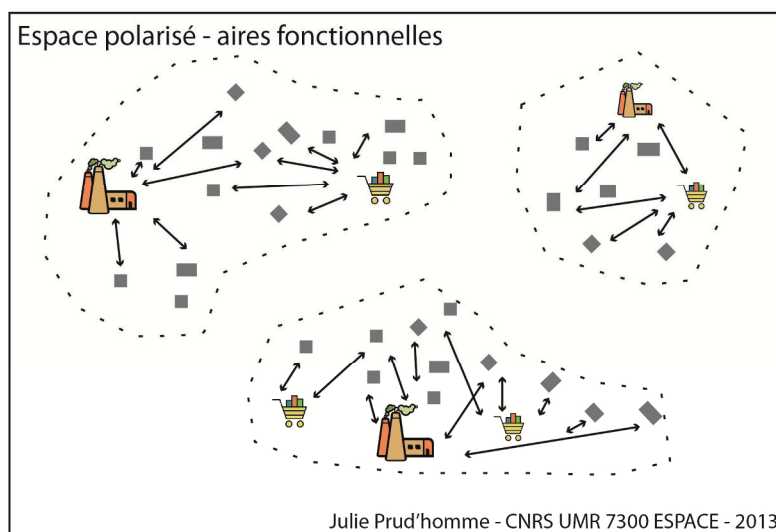
Figure 12. Des déplacements similaires dans un espace zoné



Dans ce premier cas, le territoire est divisé en zones et des usages spécifiques sont attribués à chacune. On parle aussi d'espace polarisé. La pratique du zonage est issue du constat (aux États-Unis en premier lieu) que la cohabitation harmonieuse sur un territoire des usages résidentiels, commerciaux et industriels exige une ségrégation plus ou moins prononcée entre eux, ce qui entraîne qu'on leur alloue une ou plusieurs zones exclusives ou mixtes. La Figure 12 ci-dessus représente cette situation avec des zones exclusives. Les flux de déplacement sont spatialement concentrés entre les différents espaces et ont des distances relativement constantes, quelle que soit leur importance.

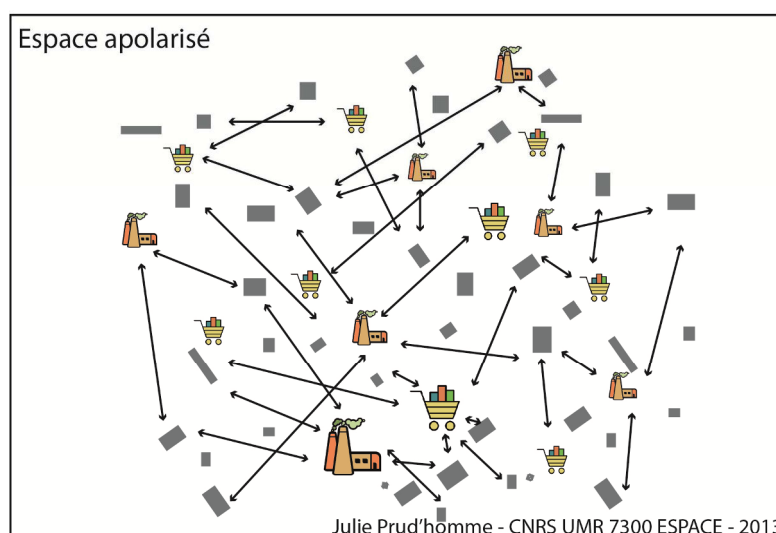
¹² Le **zonage** est un outil d'origine nord-américaine de réglementation et de contrôle de l'utilisation du sol qui consiste à diviser le territoire municipal en zones et d'attribuer à chacune des usages permis.

Figure 13. Des déplacements globalement regroupés dans des aires fonctionnelles



Le deuxième cas (Figure 13) présente le découpage de périmètres d'agglomération urbaine s'appuyant sur la définition d'aires fonctionnelles regroupant bassins de migrations quotidiennes, d'emploi, de chalandise, etc. La majorité des déplacements quotidiens se fait à l'intérieur de ces zones. Les flux sont moins concentrés que dans le premier cas mais se situent tout de même dans une même aire. La distance moyenne des flux reste modérée. On observe ce genre de situation en zones périphériques des villes.

Figure 14. Des déplacements très variés dans des espaces apolarisés



Dans le dernier cas (Figure 14), nous exposons le cas d'espaces mixtes. Les différentes activités sont réparties sur tout le territoire. Dans l'absolu, les déplacements engendrés pour accéder aux différentes aménités n'ont aucune contrainte et ne suivent pas de logique spatiale. Les origines et

destinations des déplacements ont peu de probabilité d'être similaires et les distances parcourues peuvent être très variables.

Bien que la structure spatiale des origines et destinations principales ne présente pas de polarisation essentielle dans ce dernier cas, des nuances peuvent apparaître, les jours travaillés par exemple, des polarisations temporaires des flux vers les entreprises peuvent être observées et les autres jours (week-end, vacances) vers les commerces et autres activités de loisir. Ces nuances relèvent principalement de la temporalité considérée.

B. Des configurations temporelles

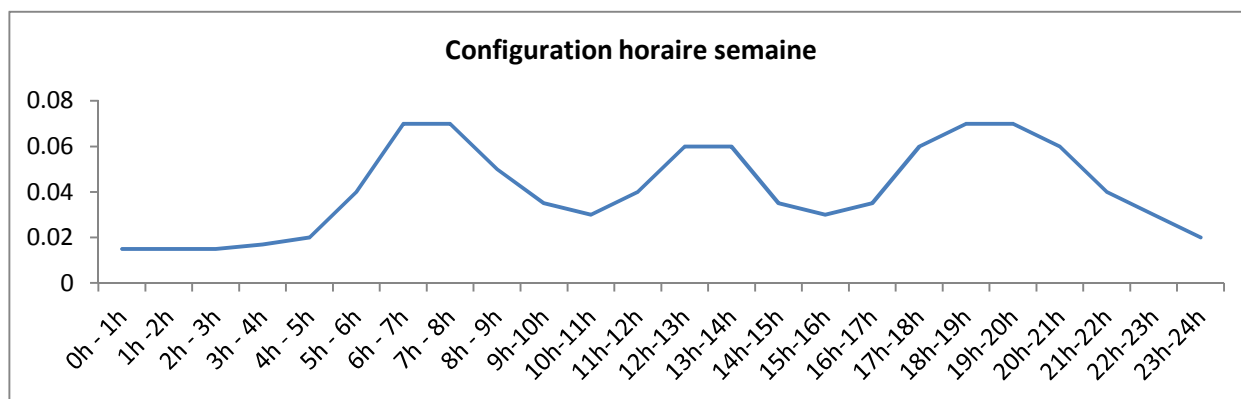
« Les mobilités deviennent plus diffuses, dans l'espace avec l'étalement urbain, dans le temps avec la désynchronisation des rythmes quotidiens ».

Bailly et Heurgon (2001)

En complément des configurations spatiales, les déplacements suivent des scénarios temporels. Les configurations temporelles des déplacements suivent les horaires de déplacements de la population. Ici, nous nous intéressons aux déplacements quotidiens et nous ne prenons pas en compte la désynchronisation des horaires. Nous distinguons alors deux profils, un scénario horaire particulier selon qu'il s'agit d'un jour travaillé ou d'un jour ouvré.

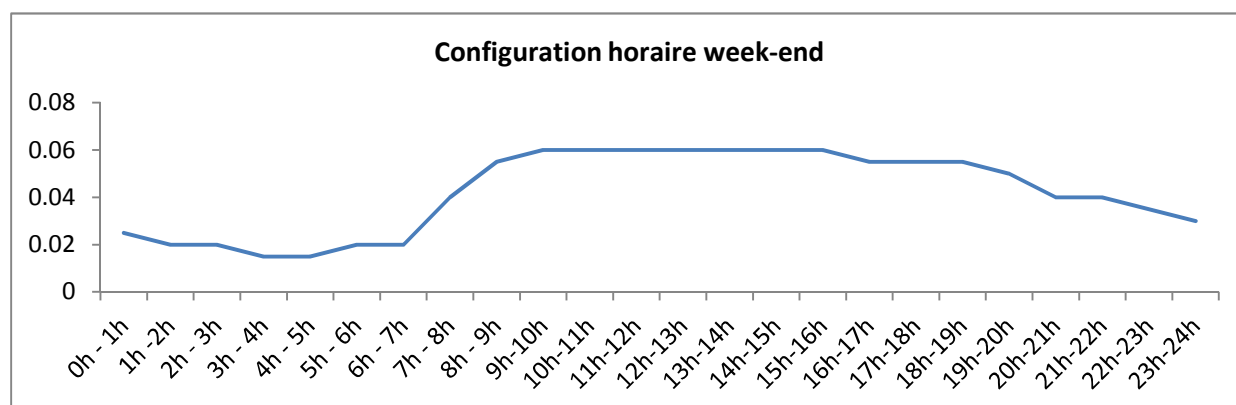
Un jour travaillé, on observe des heures de pointe le matin entre 6h et 9h et le soir de 17h à 20h. Il y a tout de même des déplacements tout au long de la journée, avec une légère augmentation à l'heure du déjeuner (Figure 15) (Bailly et Heurgon, 2001). Les heures de pointe sont idéales pour le regroupement de clients dans les services de transport du fait de l'augmentation statistique de la probabilité que des déplacements soient similaires.

Figure 15. Exemple de configuration horaire en semaine



Une journée ouvrée (de week-end par exemple, Figure 16), la distribution temporelle des déplacements est beaucoup plus homogène au cours de la journée, avec une proportion un peu plus importante des déplacements nocturnes qu'un jour de semaine. Le regroupement horaire des voyageurs dans des services de transport est statistiquement moins évident qu'un jour de semaine.

Figure 16. Exemple de configuration horaire en week-end



Les dimensions temporelles et spatiales des déplacements sont indissociables. Ces différentes configurations présentent des concentrations spatiales et temporelles variées des besoins en déplacements. Ces deux paramètres sont primordiaux car ils régissent la potentialité d'optimisation des services de transport en favorisant le regroupement des clients dans les véhicules. Dans le cas des TAD qui nous intéresse principalement dans ce travail, des fenêtres de temps allouées par les clients permettent de favoriser ces regroupements. Nous les détaillons dans la partie qui vient.

2. Des caractéristiques des TAD modulables pour en optimiser les performances environnementales

L'objectif opérationnel principal des TAD est de regrouper les usagers dans les véhicules. Pour cela, on compte sur la capacité du service à mettre en correspondance les demandes, autant du point de vue spatial que dans le temps. Pour que les systèmes de TAD soit efficaces et compétitifs par rapport à l'utilisation systématique des véhicules personnels, il est nécessaire d'optimiser les tournées des TAD en fonction des demandes des clients. Ce fut l'objet de différentes recherches dans le cadre du groupe interdisciplinaire TADvance, avec des réalisations traitant différents aspects, selon différentes disciplines :

- le territoire (Banos, Izembard et Josselin, 2002) ;
- l'intermodalité (Thevenin, 2002) ;
- la relation entre le territoire, les temporalités et la forme du TAD (Castex et Josselin, 2007) ;
- la recherche fondamentale sur les concepts de TAD (Josselin et Genre-Grandpierre, 2005) ;
- la prise en compte de la qualité de service dans les TAD (Garaix, 2007) ;
- le développement d'une démarche interdisciplinaire proposant une approche visant à concilier les travaux des disciplines informatique et géographique (Bolot, 2006 ; Chevrier, 2008) ;
- le dépôt de logiciels spécifiques (ReSAD2, GaleopSys) et le déploiement de TAD fonctionnels, tels que les TAD Evolis-Gare, TADou, Modulobus-Noël, Mod'Gen2 mis en place et déployés en collaboration avec des collectivités territoriales.

Différents travaux ont été menés en informatique pour le développement d'algorithmes d'optimisation de Transport à la Demande Multicritère et Dynamique (Atahran, 2012 ; Zhao, 2011 ; Zidi, 2012).

Les deux travaux que nous développons ici s'accordent sur la catégorie de problème à résoudre (*Dial A Ride Problem* - DARP) mais différent sur les algorithmes de résolution.

A. La souplesse des TAD : entre attrait pour les usagers et contraintes pour l'optimisation du service

La force du TAD est sa flexibilité mais c'est également ce qui complique l'optimisation de son fonctionnement (Chevrier, 2008). En effet, le fait de situer le TAD à mi-chemin entre le taxi et le bus tend à montrer que ce service s'adapte aux souhaits des usagers. La flexibilité s'exprime à différents niveaux :

- **la desserte spatiale** : les itinéraires empruntés par les véhicules assurant la desserte sont libres et définis manuellement ou optimisés de manière informatique, avec une recherche de tournées optimales en coût ;
- **les horaires** : comme les trajets ne sont pas fixes, les horaires de prise en charge et de desserte sont, au mieux, optimisés selon les souhaits des usagers.

Une des raisons du succès des TAD auprès des collectivités réside dans son moindre coût de fonctionnement. En effet, comme le TAD n'est pas régulier, celui-ci n'est déclenché que s'il y a besoin. Autrement dit, un TAD ne roule jamais à vide, contrairement à certains véhicules sur des lignes fixes. Néanmoins, ces éléments doivent être relativisés par la difficulté (et le surcoût induit) de gestion des emplois du temps des chauffeurs qui doivent être disponibles en cas de besoin, et à l'éventuelle prise en compte des distances à parcourir entre les dépôts des véhicules et la tête de ligne (distance de haut le pied) pouvant contrecarrer l'efficacité des tournées. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de dépasser certains seuils correspondant à des nombres et des localisations de clients de manière à ce que l'éloignement des véhicules ne grève pas l'efficacité du service.

a. Souplesse temps/espace : les clés de l'optimisation

Le caractère plus ou moins aléatoire de la demande et les différents points abordés montrent l'importance d'optimiser le service. Les horaires et les arrêts ne sont pas connus à l'avance et les lignes sont créées à la volée, d'où le besoin d'introduire des marges temporelles (pour réaliser des détours). Ces marges temporelles, ou fenêtres de temps, représentent la tolérance des usagers à accepter plus ou moins de retards générés par les détours nécessaires au regroupement des passagers.

Le TAD est donc un transport collectif s'adaptant à la demande des usagers et rationalisant ses coûts de fonctionnement. Ceux-ci sont tributaires et concurrents de la satisfaction des clients. C'est-à-dire que l'optimisation d'un objectif se fait parfois au détriment de l'autre. Pour aider à parachever ces objectifs, la souplesse dans les regroupements (détours) et dans les temps de parcours constitue le

meilleur moyen pour fournir des tournées satisfaisant au mieux les critères économiques, conciliés à l'obligation de service et bénéficiant d'une bonne qualité de service.

b. L'analyse territoriale

Selon R. Chevrier, informaticien de formation ayant réalisé une thèse en géographie, les sciences humaines ont une vision globale, voire transversale, des problèmes de déplacement. Tandis que l'informatique apporte des réponses à plus grande échelle, les sciences humaines et statistiques permettent de considérer les questions à travers une analyse territoriale, c'est-à-dire considérer les flux de déplacements à l'échelle d'un territoire. Pour l'auteur, « comprendre l'orientation des déplacements et l'enchevêtrement logique de ceux-ci permet de faciliter les regroupements de voyages mais également d'offrir une meilleure qualité de service ». Une analyse globale des déplacements permet d'identifier en amont ceux qui se ressemblent en termes d'origine, de destination et d'horaires. Cela peut permettre d'éviter des détours préjudiciables et ainsi améliorer significativement le service (en termes de perte de temps par l'utilisateur).

Cette connaissance permet d'emblée d'introduire des optimisations statistiques et des modèles géographiques qui favorisent certains regroupements, augmentant ainsi les taux de remplissage dans les véhicules tout en minimisant les retards dus à des détours coûteux. De plus, cette analyse permet de recenser les récurrences dans les dessertes et éventuellement d'anticiper les flux selon des modèles que l'on adapte au fur et à mesure que la connaissance des habitudes de déplacement s'affine (Chevrier, 2008).

B. Objectifs : optimiser les services de TAD

Selon la politique de desserte appliquée, la solution « optimale » varie en fonction des critères adoptés. On peut envisager différentes solutions, chacune optimale pour un objectif. En voici deux exemples :

- **Objectif économique** : puisque l'utilisation de véhicules supplémentaires engendre un surcoût, on limite au maximum le nombre de véhicules mobilisés. Cependant, l'économie réalisée se fait au détriment de la qualité de service. En effet, les retards cumulés sont importants par rapport aux temps théoriques de parcours ;
- **Objectif de qualité de service au client** : en affrétant assez de véhicules, les clients acheminés ne souffrent d'aucun retard, par-contre le regroupement des voyageurs dans les

véhicules est réduit et le cumul des temps et distances de parcours augmente. Le coût économique du service en est augmenté.

Les objectifs sont contraints par différents paramètres tels que le nombre de véhicules, les horaires ou encore la tolérance des clients vis-à-vis des retards occasionnés.

Si nous plaçons les objectifs à égalité et que nous les optimisons concurremment, les solutions présentées sont équivalentes puisque chacune d'entre elles maximise (ou minimise) un objectif en particulier. Il appartient finalement à l'AOT (Autorité Organisatrice des Transports) de décider de la solution à mettre en œuvre.

Le problème d'optimisation de transport de personnes est bien connu en informatique, discipline qui est mise à contribution pour pallier les très fortes complexités de ces problèmes (Chevrier, 2008 ; Garaix, 2007).

a. Des algorithmes pour l'optimisation des TAD

En 2006 et 2008, trois thèses portant sur l'optimisation des tournées de TAD ont été effectuées au sein de l'UMR ESPACE (CNRS 7300) et de l'UMR THEMA (CNRS 6049), encadrées par Didier Josselin, parfois en cotutelle avec des collègues informaticiens. Bien que s'intéressant à la même problématique, chacun des travaux a abouti au développement d'algorithmes différents. Ils abordent la question selon des fonctions d'objectifs et des méthodes différentes.

Dans sa formalisation, le TAD appartient à la famille des problèmes de tournées très étudiés en recherche opérationnelle, notamment avec le problème du voyageur de commerce.

b. Le problème du voyageur de commerce

Le problème du voyageur de commerce (*Travelling Salesman Problem*, TSP), déjà étudié en 1956 par Kruskal et Flood, consiste en ce qu'il doit visiter un ensemble de villes une seule fois en revenant au point de départ, tout en minimisant la distance parcourue. Départ et arrivée de la tournée sont confondus mais ne sont pas fixés préalablement.

Selon R. Chevrier (2008), dans sa forme de base, le TSP ne dispose que d'un seul véhicule (autrement dit un seul chemin), mais on peut travailler avec n véhicules. C'est le n -TSP, qui consiste à minimiser la somme des distances parcourues par chacun des véhicules qui se partagent la réponse à une demande de déplacements. Le TAD est d'un niveau de complexité plus grand puisque les

clients montent dans le véhicule à un arrêt pour descendre à un autre et que la qualité de service entre en ligne de compte.

Selon T. Garaix (2007), une des premières extensions naturelles du TSP fut de considérer le transport de marchandises récoltées en cours de trajet et ramenées à un dépôt unique par plus d'un véhicule, c'est le problème standard du calcul des tournées de véhicules ou *Vehicle Routing Problem* (VRP). Ce problème prend tout son intérêt si on y intègre une contrainte de capacité sur les véhicules pour le *Capacited Vehicle Routing Problem* (CVRP). Les problèmes se sont ensuite enrichis par des contraintes temporelles (fenêtres de temps) sur les lieux à visiter pour le *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) ; des contraintes de précédence entre les lieux à visiter comme dans le Problème de Ramassages et Livraisons ou *Pick Up & Delivery Problem* (PDP), où les marchandises doivent être transportées d'un lieu vers un autre ; d'autres contraintes de qualités de service de plus en plus fines, comme le temps de transport maximal, liées au transport de biens particuliers et notamment au transport de personnes. Ces cas particuliers de PDP sont souvent désignés sous le terme de *Dial-a-Ride Problems* (DARP), ou Problèmes de Transport à la Demande. Dans une majeure partie de la littérature, l'objectif est la minimisation de la distance totale parcourue. Dans un DARP, l'intégration de certains critères de qualité de service, n'ayant pas d'expression naturelle sous forme de contraintes, peut conduire à des fonctions objectif différentes.

Dans son rapport de thèse (2007), T. Garaix propose alors une sélection d'indicateurs de qualité de service des TAD à considérer et introduit les fenêtres de temps (*Time Window* – TW). Le terme de qualité de service dans un sens très large englobe les intérêts de tous les acteurs du système : passagers, chauffeurs, transporteurs, collectivités locales, etc. Quel que soit l'opérateur du TAD, le calcul des tournées de véhicule doit tenir compte de critères de coûts financiers ; que ce soient des minimisations et des plafonnements de coûts d'exploitation ou des maximisations et des seuils de profits. À cela, on oppose généralement des critères de qualité de service offerts aux passagers, induits par des objectifs sociaux et de confort. Néanmoins, le respect de certains de ces critères a clairement un impact économique positif à plus ou moins long terme sur le TAD. Par exemple, il vaut mieux éviter de rendre des passagers très mécontents car cela peut faire fortement chuter la demande et par suite la rentabilité. Pour ce qui est du coût des tournées calculées, il reste pénalisant. Cependant, des critères de qualité de service comme le regroupement des passagers dans un véhicule peuvent directement amener une réduction du coût des solutions. La fenêtre de temps est une contrainte d'optimisation qui permet de favoriser ce regroupement.

c. *Dial-a-Ride Problem (DARP)*

Reste à résoudre la question des tournées. Pour R. Chevrier (2008), celle-ci pose trois problèmes assimilés au *Dial-a-Ride Problem* (DARP) pour le transport de personnes, ou encore au *Pick-up and Delivery Problem* (PDP) pour les marchandises. Le *Dial-a-Ride Problem*, est considéré par Savelsbergh et Sol (1995) comme un PDP où l'on considère des personnes. D'un point de vue formel, une charge à transporter vaut 1 et cette charge peut avoir un rôle dans la recherche d'optimalité (qualité de service pour le voyageur). Le DARP consiste en l'organisation et la conception de tournées de véhicules pour n utilisateurs requérant chacun leur propre lieu de prise en charge et leur propre lieu de desserte. Dans sa version de base, le DARP est résolu avec une flotte de véhicules identiques, ayant tous les mêmes caractéristiques et le même dépôt. L'objectif de ce problème consiste à planifier une tournée en répondant au mieux aux souhaits des usagers (qualité de service, durée des courses) tout en minimisant les coûts de fonctionnement (nombre de véhicules et de chauffeurs nécessaires...).

Parmi les différentes solutions mobilisables pour résoudre le DARP, autant R. Chevrier que T. Garaix se sont orientés vers les heuristiques. En effet, dans des situations réelles, la recherche de la solution exacte optimale est trop gourmande en temps. Ces algorithmes cherchent une bonne solution parmi un éventail de solutions réalisables, et pas forcément la meilleure solution. Cela permet de traiter des grandes quantités de données relativement rapidement. Cette classe d'algorithmes peut donner lieu à différentes approches telles que :

- les méthodes inspirées de la nature, comme les **algorithmes génétiques** qui génèrent des ensembles de solutions successifs par analogie avec les principes de sélection naturelle de Darwin (1859), développée dans les travaux de R. Chevrier, ou dans la thèse de J. Bolot, dans le cas de TAD en convergence ;
- les méthodes de voisinage, comme **la recherche tabou** (recherche locale avec interdiction temporaire de retour arrière), travaillée par T. Garaix pour l'optimisation des tournées de tous types de TAD. Il se base sur un algorithme qui repose sur celui proposé par (Desrochers, 1988) pour le cas du problème de plus court chemin avec fenêtres de temps.

Les travaux de T. Garaix ont donné lieu à la commercialisation d'une solution d'optimisation de TAD par la société Prorentsoft. En effet, le noyau d'optimisation Galeopsys est notamment utilisé pour l'organisation des TAD dans le Doubs Central (service TADOU). C'est celui que nous

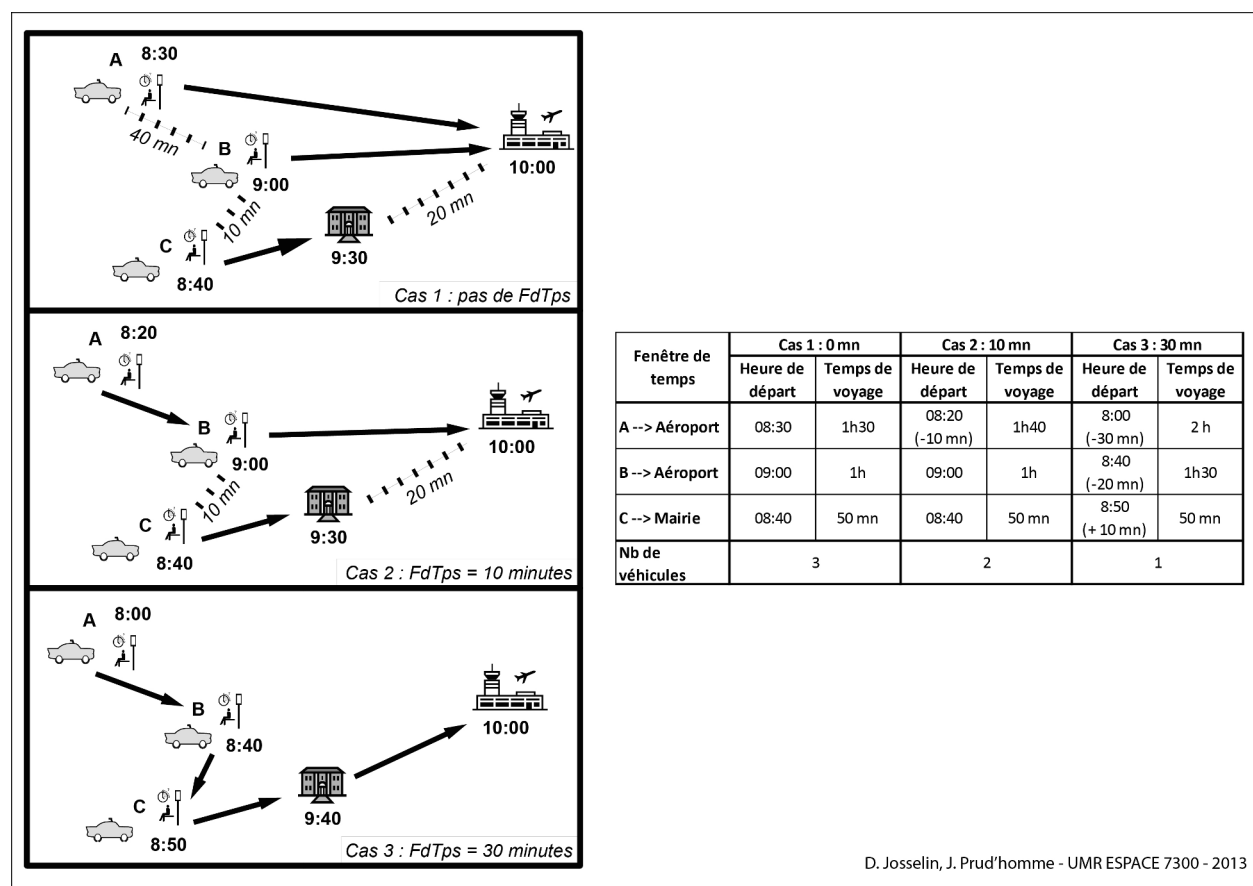
utilisons dans ce travail de recherche. Pour plus de détails sur les algorithmes, nous invitons nos lecteurs à se reporter au travail de thèse de Thierry Garaix (Garaix, 2007)

Le noyau Galeopsys résout un DARP avec fenêtres de temps et véhicules multiples (N-TW-DARP) et propose un algorithme d'optimisation qui fonctionne en trois phases :

- une première phase pendant laquelle on construit des tournées réalisables ;
- une seconde phase où, par le biais d'insertions et de suppressions de requêtes dans les tournées recombinaées, on cherche à améliorer la qualité de la solution ;
- une dernière procédure fixe les dates effectives de réalisations des services.

L'insertion des requêtes se fait dans la tournée où elle est la moins coûteuse. L'insertion d'une requête dans une tournée ne doit pas modifier l'ordre déjà établi entre les sommets composant cette tournée à une itération précédente. Les fonctions d'objectifs des optimisations sont principalement économiques (en temps et en argent). La fenêtre de temps accordée par les clients permet de regrouper les clients dans les véhicules et ainsi de réduire le nombre de véhicules mobilisés pour répondre à la demande de déplacements. Dans la figure qui suit (Figure 17), on considère trois personnes qui souhaitent soit aller à l'aéroport (clients A et B), soit se rendre à la mairie (client C) avec des horaires proches. Les deux premiers doivent impérativement être à l'aéroport à 10h00 alors que le dernier est un peu plus souple sur l'heure d'arrivée à la mairie. Selon la fenêtre de temps autorisée par les clients, le regroupement des clients est fait de manière partielle (Cas 2 : fenêtre de temps de 10 mn) ou complète (Cas 3 : fenêtre de temps de 30 mn). Dans le cas présenté, une fenêtre de temps de 20 mn ne permet pas d'améliorer l'optimisation des tournées. Le client A, qui se trouve en bout de tournée, est celui qui a le plus de désagréments avec l'optimisation des tournées. Dans le troisième cas, le temps de trajet de ce client est augmenté de 30 mn (maximum autorisé) par rapport au plus court chemin mais cela ne représente (que) 25% du temps de trajet total. Du point de vue du service, l'augmentation de la fenêtre de temps permet de réduire le nombre de véhicules mobilisés pour répondre à la demande et ainsi la distance totale parcourue par le(s) véhicule(s), notamment la distance parcourue « à vide » (sans aucun client dans le véhicule). Cela est favorable à la minimisation des couts de fonctionnement.

Figure 17. Fenêtres de temps et optimisation du service de TAD



On remarque la fenêtre de temps autorisée par l'utilisateur n'est pas systématiquement utilisée dans sa totalité (dans la Figure 17, situation des usagers B et C dans les cas 2 et 3).

En plus de cette souplesse temporelle de la demande de déplacement pour l'optimisation des TAD, la montée en charge (augmentation du nombre de demandes) peut statistiquement favoriser la concentration temporelle et spatiale de la demande et ainsi permettre l'enchaînement de plusieurs courses (une course = une réponse optimisée à une ou plusieurs demandes de déplacement) par un même véhicule.

Dans le fonctionnement de ce noyau d'optimisation, les tournées sont calculées en fonction du réseau routier de manière intégrée. Il ne renseigne en sortie que sur la succession des arrêts visités, aucune information n'est donnée sur le chemin effectif emprunté.

3. Déterminer l'influence des réseaux routiers sur les performances des TAD

Pour évaluer l'impact des caractéristiques des réseaux routiers sur les performances des TAD (performances du service et performances environnementales avec les émissions de polluant), nous avons besoin de pouvoir les différencier quantitativement. Visuellement, « à l'œil nu », des réseaux peuvent paraître strictement différents. La différence entre un réseau routier en corridor (cas en fond de vallée, le long des littoraux) et un réseau en étoile (cas en plaine avec peu d'obstacles naturels) semble absolument évidente de prime abord, pourtant il n'est pas aisé de quantifier cette observation. Nous souhaiterions alors catégoriser les réseaux routiers pour les relier à des comportements en termes d'émissions de polluants par les véhicules circulant dessus. Nous verrons qu'il est laborieux de créer des catégories à partir des caractéristiques morpho-topologiques des réseaux routiers. Nous traiterons donc cet aspect à partir des formes d'accessibilité produites par les réseaux routiers (la forme des plus courts chemins engendrés).

Dans la partie qui suit, nous survolons la question des indicateurs actuellement disponibles et leurs limites évidentes pour la catégorisation formelle des réseaux routiers avant de présenter l'approche choisie pour décrire les réseaux dans l'objectif de quantifier l'impact de différentes caractéristiques des réseaux sur les émissions de polluants.

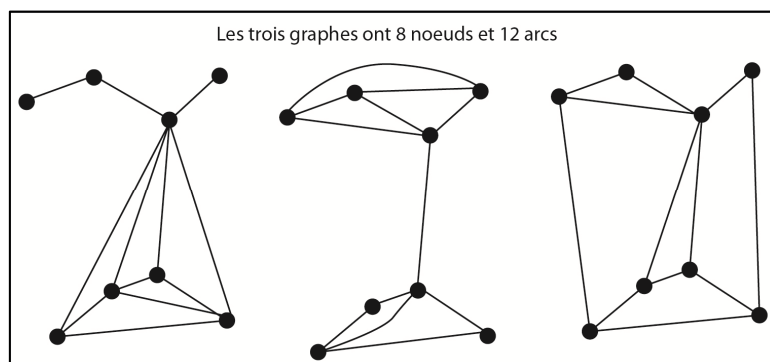
A. Une variété d'indicateurs pour caractériser les réseaux

En 1997, Beguin et Thomas mettaient en évidence l'impossibilité de caractériser de façon synthétique les réseaux routiers. En effet, il existe un très grand nombre des méthodes et de modèles pour les décrire mais malgré la diversité des approches développées depuis les années 1960-1970, aucune à ce jour ne permet de différencier formellement deux réseaux routiers entre eux.

Actuellement, les réseaux sont majoritairement caractérisés avec des indicateurs de centralité, de connexité et de connectivité du maillage. Ces indices, plutôt simples à calculer, sont issus de la théorie des graphes (Berge, 1963 ; Busacker et Saaty, 1965 ; Kansky, 1963). Ils se basent principalement sur le nombre de nœuds et/ou d'arêtes mais ne prennent pas en compte la longueur des liens (arêtes). Ainsi, il est fréquent de trouver des réseaux topologiquement différents mais avec des indices de connectivité identiques (Figure 18). Pour affiner la description de la connectivité il est possible de prendre en compte les liaisons indirectes entre les sommets en s'intéressant aux cycles ou circuits dans le graphe. Un cycle est une chaîne d'arcs telle que le même arc ne figure pas deux fois

dans la séquence d'arcs et dont les sommets aux extrémités de la chaîne coïncident. Cet indice évalue la complétude du maillage.

Figure 18. Trois graphes différents avec les mêmes indices de connectivité (Genre-Grandpierre, 2000)



Ces indices de forme de la théorie des graphes ne tiennent pas compte, par définition, de la disposition spatiale du réseau. Cela diminue d'autant leur pouvoir discriminant, mais surtout ne permet pas de décrire la façon dont ils occupent la surface, la qualité de leur desserte spatiale qui est pourtant un paramètre fondamental de l'offre de transport (Genre-Grandpierre, 2000).

Que ce soit les indicateurs issus de l'analyse des distributions de fréquences de la matrice des plus courts chemins, provenant de la géomorphométrie (adaptés à l'analyse des réseaux dendritiques, en sens unique de circulation tels que les réseaux hydrauliques), les valeurs et vecteurs propres des matrices d'adjacence des graphes ou même une composition d'indicateurs de chaque catégorie, il n'est pas possible de distinguer quantitativement de manière synthétique les réseaux routiers (Beguin et Thomas, 1997). En revanche, des indices existent pour décrire le fonctionnement des réseaux routiers, pour quantifier l'influence des plus courts chemins sur l'utilisation du réseau, avec notamment la méthode de marche aléatoire sur les réseaux spatiaux (*Random walk*) (Barthélemy, 2010).

En conclusion, bien qu'il existe une très grande variété de méthodes, modèles et indices pour caractériser les différents aspects des réseaux routiers, aucun ne permet de catégoriser les réseaux routiers de manière synthétique.

B. Décrire les caractéristiques impliquées dans la production d'émissions

Pour nous aider à catégoriser les réseaux routiers, nous décidons d'analyser indépendamment des aspects morphologiques et des aspects fonctionnels pouvant impacter les émissions de polluants.

Comme nous l'avons largement détaillé précédemment, les émissions de polluants sont directement liées aux paramètres de distance et de vitesse. Si la relation distance/émissions est linéaire, la relation vitesse/émissions est plus complexe et dépend du type de véhicule et de carburant. On met donc en place des méthodes basées sur ces deux paramètres. Les caractéristiques liées aux distances (tronçons, emprise au sol) permettent principalement de caractériser la morphologie des réseaux alors que l'analyse des vitesses appliquées aux tronçons de route et leurs impacts sur les chemins les plus rapides permet de préciser la fonctionnalité d'un réseau.

a. Des méthodes d'analyse spatiale pour décrire l'emprise au sol des réseaux routiers

Dans ce travail, on résume la morphologie des réseaux routiers à leur emprise au sol pour leur analyse. Son motif est composé de tronçons de route et de nœuds à leurs intersections. Un tronçon de route peut être décrit par les nœuds se trouvant à ses extrémités. Les intersections ont un rôle topologique primordial dans la répartition des flux en offrant une alternative de chemin potentiellement plus avantageux. On s'intéresse alors à des indices liés aux distances au sein du réseau, à sa densité et à la distribution spatiale des intersections du réseau.

- Description structurelle avec des indicateurs simples de distance

Pour commencer la description d'un réseau routier, on peut utiliser des statistiques simples qui portent sur la longueur des tronçons de route. Celles-ci ont un impact certain sur la longueur des chemins les plus rapides. Un histogramme des fréquences des longueurs des tronçons peut permettre d'associer le réseau à un contexte (urbain, rural, périurbain). Une longueur moyenne des tronçons de route importante implique l'absence d'intersections, ce qui contraint les itinéraires. Cela peut impliquer des longueurs plus grandes des plus courts chemins en temps.

b. Description fonctionnelle des réseaux

L'aspect fonctionnel d'un réseau est relatif aux vitesses pratiquées sur les tronçons de route.

- Analyse des vitesses appliquées sur le réseau

En complément de l'analyse des longueurs des tronçons, l'analyse des vitesses peut apporter des renseignements globaux sur la propension des réseaux à provoquer l'émission de polluants. On peut classiquement analyser la distribution des vitesses d'un réseau, leur dispersion et leur variabilité.

- Contexte topologique des intersections

Une intersection, un nœud, a un rôle central dans la topologie du réseau. C'est de là que les flux se séparent ou se rejoignent. L'indice de Marchand, permet d'évaluer les contraintes posées par le réseau routier à la mise en relation des nœuds entre eux. L'indicateur en vitesse moyenne de Marchand (V_i) se définit pour chaque nœud i comme la somme des distances entre i et les j autres nœuds, divisée par la somme des temps T_{ij} nécessaires pour parcourir ces distances D_{ij} :

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^N D_{ij}}{\sum_{j=1}^N T_{ij}}$$

Plus cet indice est élevé, plus le réseau permet au départ du point i une vitesse moyenne de déplacement élevée, donc plus il tend à rapprocher fonctionnellement les nœuds. Une moyenne des V sur tous les nœuds i donnent un indice global de qualité du réseau. Selon (Genre-Grandpierre, 2000), cet indice reste toutefois peu satisfaisant puisqu'un réseau aberrant qui imposerait entre tous les couples de points ij de très larges détours sur lesquels il est possible de circuler très vite a un bon indice de Marchand. Difficile dans ce cas de le qualifier de « pertinent ».

Néanmoins, en comparant deux réseaux qui auraient des vitesses globales similaires, la variation de l'indice de Marchand peut nous donner des indications sur les distances à parcourir sur le réseau considéré. On observe une valeur plus importante si le réseau engendre des distances à parcourir plus importantes.

- Indice de détour

Le réseau routier contraint un ou plusieurs chemin(s) pour relier deux points, imposé par les infrastructures. Cette contrainte est d'autant plus importante lorsque l'on souhaite optimiser le temps de transport et emprunter le chemin le plus court en temps, le plus rapide. Ce chemin le plus rapide n'a pas obligatoirement une longueur proche de la distance à vol d'oiseau, ni même équivalente à celle du plus court chemin en distance. On calcule donc l'indice de détour Dd entre la longueur du plus court chemin et la distance à vol d'oiseau. Le plus court chemin peut être calculé selon la distance ou selon le temps. Comme nous travaillons à partir d'une optimisation du temps, nous choisissons de calculer l'indice de détour par rapport au chemin le plus rapide. Plus Dd est important, plus la longueur du chemin le plus rapide (PCC) est proche de la distance à vol d'oiseau, moins les détours sont importants.

$$Dd = \frac{D_{vol\ d'oiseau}}{D_{PCC}} \times 100$$

avec

Dd : indice de détour entre la distance à vol d'oiseau et la longueur du plus court chemin ;

$D_{vol\ d'oiseau}$: distance à vol d'oiseau (km) ;

D_{PCC} : longueur du chemin le plus rapide (plus court chemin en temps) (km).

Cet indicateur nous renseigne sur la propension du réseau à provoquer une augmentation des distances parcourues lorsque les chemins sont optimisés pour être les plus courts en temps. Celui-ci est sans unité, compris entre 0 et 1. Plus la valeur de l'indice est proche de 1, plus le réseau permet des distances proches des plus courtes (distances à vol d'oiseau). A l'inverse, un indice proche de 0 indique une propension forte à imposer des détours importants.

- Efficacité

Il est souvent possible de relier deux points par différents chemins. Certains pourront se faire avec une vitesse moyenne bien plus élevée, mais les distances à parcourir seront telles qu'on mettra plus de temps au final que si on utilise un chemin avec une vitesse moyenne plus réduite. L'efficacité Ef_{trajet} est la distance à vol d'oiseau rapportée cette fois-ci à la durée du trajet T_{trajet} et non avec la seule vitesse pratiquée. Plus l'indice d'efficacité est important, plus le trajet est « efficace ».

$$Ef_{trajet} = \frac{D_{vol\ d'oiseau}}{T_{trajet}}$$

avec

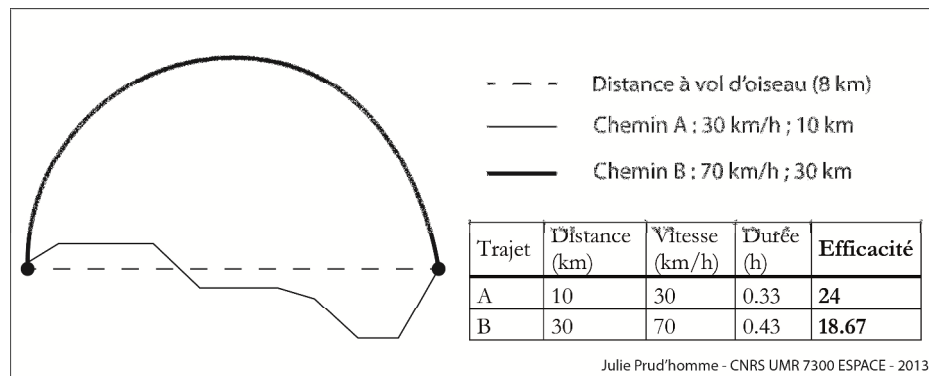
Ef_{trajet} : efficacité du trajet (km/h) ;

$D_{vol\ d'oiseau}$: distance à vol d'oiseau entre les points de départ et d'arrivée (km) ;

T_{trajet} : durée effective du trajet (h).

La Figure 19 qui suit illustre ce concept. La distance à vol d'oiseau entre les deux points est de 8 km (le cas présenté est fictif). Selon qu'on choisit un chemin parcouru à une vitesse moyenne de 30 km/h pour 10 km (trajet A) ou qu'on emprunte celui qui permet une vitesse moyenne de 70 km/h, mais qui a une longueur de 30 km (trajet B), la durée du premier (trajet A) est plus courte. Ainsi, ce trajet, bien que plus lent, est plus efficace que le second ($Ef_A = 24$; $Ef_B = 18,67$).

Figure 19. Efficacité d'un trajet



Cet indicateur d'efficacité permet d'analyser la tendance des réseaux routiers, avec les vitesses qui leur sont associées, à favoriser l'augmentation des distances parcourues par les véhicules, ce qui a inévitablement une incidence forte sur les quantités de polluants émis.

- Homogénéité des vitesses au cours d'un trajet

À notre connaissance, aucune étude ne porte sur la composition des trajets pour le calcul des émissions. Pourtant, au cours d'un trajet, outre les paramètres de distance et de vitesse qui entrent en compte dans le calcul des émissions « à chaud », des surémissions liées à l'accélération surviennent à chaque changement de vitesse. Entre autres, un changement de vitesse réglementaire entre deux tronçons provoque de fait un changement de vitesse sur un trajet. On calcule donc la fréquence d'intersections provoquant un changement de vitesse, pour lesquelles on considère une surémission, au cours d'un trajet. On obtient ainsi un indice d'homogénéité de la vitesse. Cet indice prend en compte la structure topologique locale des plus courts chemins pratiqués en théorie par les véhicules. Il fournit une estimation de la distribution de la vitesse pour chaque itinéraire d'un véhicule. Il s'agit du ratio entre le nombre d'intersections avec rupture de vitesse j_{break} et le nombre total d'intersections j_{total} . Il est calculé comme suit :

$$H_n = \frac{j_{break}}{j_{total}}$$

Plus cet indice est élevé, plus le réseau est hétérogène en termes de vitesse et plus il a tendance à favoriser la survenue de surémissions à l'accélération.

Nous avons détaillé dans cette partie l'importance que peuvent avoir des paramètres structuraux des déplacements dans l'évaluation des performances des systèmes de transport et plus spécifiquement des TAD. La demande en déplacement peut prendre différentes formes spatio-temporelles avec une influence directe sur la qualité d'optimisation d'un système de TAD et sur l'enchaînement de courses dans des tournées. L'optimisation de ces derniers se base justement sur des fenêtres de temps

allouées par les clients pour améliorer la capacité à regrouper des voyageurs dans des mêmes véhicules. Le réseau routier sur lequel les véhicules circulent contraint les chemins parcourus par les véhicules et plus particulièrement la composition des plus courts chemins, en distance et en temps. Selon ses caractéristiques structurelles et fonctionnelles, il influe de manière variable autant sur les performances des services de TAD que sur la quantité de polluants émis par les véhicules. Cela peut être consécutif à une augmentation sensible des distances parcourues ou en lien avec les vitesses pratiquées sur le réseau.

Pour évaluer l'impact de chacun de ces éléments sur les performances des services de TAD, nous avons besoin de nous doter d'un outil de simulation par lequel ces éléments sont paramétrables. Pour l'évaluation particulière des quantités de polluants émises par le service de TAD selon ces mêmes critères, une méthode de calcul des émissions produites sur chaque tronçon est nécessaire.

Chapitre 6 Un modèle pour le calcul des émissions de polluants à l'échelle du tronçon de route : GREEN-DRT

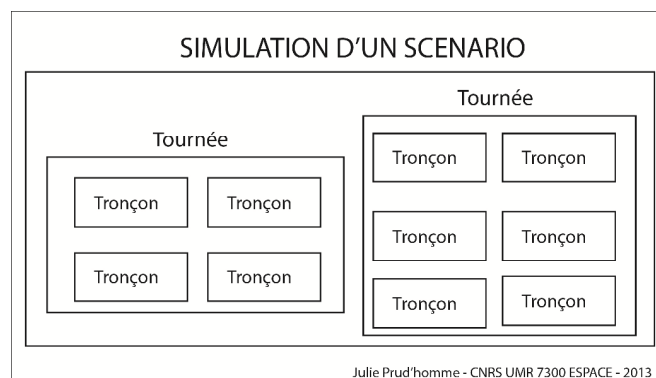
Nous avons vu que les modèles utilisés en France et en Europe (MEET et COPERT IV), ne peuvent être employés tels quels pour évaluer les émissions de polluants inhérentes au fonctionnement des services de transports à la demande. Ils ne permettent, en effet, pas la prise en compte des éléments structurels détaillés dans la section précédente et ainsi d'en évaluer l'influence.

Notre étude se base sur des simulations dans lesquelles on modélise les déplacements d'individus d'un point A à un point B sur un réseau viaire. Ce contexte nous permet, en connaissant les types des véhicules, le nombre de déplacements et les chemins exacts empruntés, de mettre en place un modèle d'émission des polluants à l'échelle du tronçon de route.

1. Choix de l'environnement de développement : Common Lisp

Nous avons besoin d'un langage de programmation pour réaliser le module GREEN-DRT de calcul de polluants, et après avoir consulté un expert (Rémi Prud'homme) avec un premier cahier des charges approximatif, nous avons choisi le Common Lisp (CL). En effet, le calcul des émissions de polluants produites au cours d'un trajet, à l'échelle du tronçon de route, se matérialise par un calcul sur une succession ordonnée de tronçons. Une structure de données bien adaptée pour traiter de telles données est la liste chaînée. Or, le langage Lisp, nom adapté de l'anglais *list processing*, est basé en grande partie sur la gestion telles listes (Seibel, 2005). De plus, le calcul des émissions est arborescent, avec une simulation qui est formée de N tournées, elles-mêmes composées de N' tronçons de route (Figure 20). Il s'agit intrinsèquement d'une structure emboîtée, base même de la programmation en Common Lisp. Enfin, notons que des supports de développement en Common Lisp existaient dans l'environnement proche de cette thèse, c'est-à-dire des personnes maîtrisant ce langage sous différents aspects (Rémi Prud'homme pour le Common Lisp et Didier Josselin pour Lisp Stat). Elles ont participé à la structuration de l'algorithme et ont codé les programmes dédiés de l'application.

Figure 20. Arborescence des objets dans GREEN-DRT



Les « passerelles » entre les logiciels, moins exigeantes, auraient pu être écrites dans un autre langage mais CL était également adapté. Les arguments principaux ont été :

- CL manipule facilement des chaînes de caractères (le logiciel ArcGIS génère des textes et non des tableaux de nombres, difficiles à utiliser directement pour des calculs) ;
- CL est un « langage objet » interactif et compilé, symbolique, ce qui facilite l'écriture, le test, la mise au point et l'évolution du logiciel. Le détail des calculs à réaliser a évolué au fur et à mesure de nos travaux : les évolutions successives ont été aisément implémentées ;
- CL est puissant pour le calcul scientifique et a permis de créer un générateur de polynômes (symbolique) nécessaires au calcul des émissions de polluants. Il est particulièrement fiable pour les calculs du type de ceux qu'on effectue (calcul de polynômes en virgule flottante) ;
- CL peut fonctionner en « mode interactif » ou en « mode compilé » : le « mode interactif » est très utile pour tester le code au fur et à mesure sur des petites simulations (petit volume de données), par contre, pour traiter des cas pratiques dans lesquelles le volume de données à traiter est beaucoup plus important, le « mode compilé » est mieux adapté, car beaucoup plus rapide ;
- CL est un langage normalisé depuis 1994 (norme « ANSI X3.226-1994 Information Technology Programming Language Common Lisp »). En 1997, l'ISO publie la norme ISLISP (en) ISO/IEC 13816:1997(E), révisée en 2007 par la norme ISO/IEC 13816:2007(E). Cela peut permettre dans le futur de « porter » aisément le code créé sous d'autres systèmes informatiques si nécessaire.

Notons que d'autres langages de programmation dits « de script » (Python, Ruby, Perl) ne respectaient pas nos contraintes (langages non symboliques qui n'ont pas de mode macro performant, les calculs en virgule flottante sont mal maîtrisables, pas de mode compilé natif : les temps de traitement sont beaucoup plus longs). Par ailleurs, ces langages n'ont pas été normalisés et ceci pourrait poser des problèmes de maintenance à long terme.

2. Le modèle d'émission développé

Notre modèle, GREEN-DRT (*Geographical Reasoning on Emission Estimations based on road Network shape applied for Demand Responsive Transport*), dérive du projet MEET (*Methodologies for Estimation of Emissions from Transport*) (Hickman *et al.*, 2003). La nature et les quantités de polluants produits par les véhicules dépendent des facteurs suivant :

- le type et la cylindrée des véhicules (citadine, berline, monospace, minibus, bus, autobus) ;
- la vétusté du véhicule et sa capacité à réduire les émissions, sur la base des normes fixées par l'Union Européenne ;
- le type de carburant ; essence et gasoil sont comparés dans notre étude ;
- la température ambiante, fixée ici à 15°C, est celle du moteur au démarrage ; nous rappelons que lorsqu'un moteur est froid, il sur-émet ; au-delà de 6 km le véhicule est considéré comme chaud et fonctionne de manière optimale (Joumard *et al.*, 1995) ;
- la vitesse du véhicule qui dépend du réseau ; la relation entre la vitesse et l'émission n'est pas linéaire ; plus précisément la consommation est plus importante dans les faibles vitesses et dans les grandes vitesses ; dans l'intervalle 50-70 km/h ; les émissions rapportées au kilomètre sont minimales ;
- les accélérations et les décélérations du véhicule (Int Panis, Broekx et Liu, 2006) sous l'effet des intersections, des stops et des feux (Brundell-Freij et Ericsson, 2005) ; dans notre cas, nous ne disposons pas des informations sur les feux ni les stops ou les céder-le-passage, mais nous tenons compte de tous les changements de vitesse ;
- le rythme de conduite associé au conducteur (André, Rapone et Joumard, 2006) ;
- les distances parcourues.

Un extrait du code développé pour le calcul des émissions est présenté dans l'Annexe 1 (p. 243).

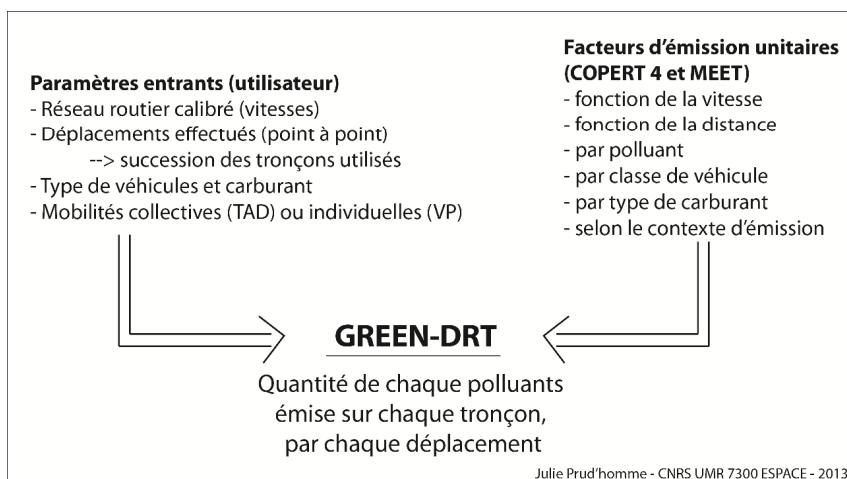
GREEN-DRT permet de calculer indépendamment les émissions des gaz et substances présentées dans le tableau qui suit (Tableau 5). Tous ne sont pas concernés par les surémissions.

Tableau 5. Polluants et GES considérés dans GREEN-DRT, selon les contextes de circulation

Composé chimique	Description	À chaud	À froid	À l'accél.
CO₂	Dioxyde de carbone – Gaz à effet de serre (GES)	X	X	X
CO	Monoxyde de carbone	X	X	-
NO_x	Oxydes d'azote	X	X	X
PM	Microparticules	X	-	X
COV	Composés Organiques Volatiles, dont les Hydrocarbures (HC)	X	X	X

Ce modèle est directement inspiré de MEET et COPERT. La grande différence tient du contexte de mise en œuvre du modèle. Ainsi, l'association des modèles MEET et COPERT et des données relatives aux chemins empruntés permet de calculer les émissions produites par les véhicules sur chaque tronçon avec GREEN-DRT (Figure 21). Le réseau routier est une variable en entrée du modèle.

Figure 21. Principe général de GREEN-DRT



A. Le calcul des émissions

Les émissions de polluants considérés dans GREEN-DRT sont de deux formes : des émissions de « base » liées à la distance parcourue et la vitesse de circulation (émissions à chaud) et des surémissions qui s'ajoutent aux premières de manière ponctuelle (surémissions à froid et à l'accélération). La figure qui suit (Figure 22) présente le lien entre le séquençage des tronçons de route au cours d'un trajet et le calcul des émissions.

Le calcul des émissions dans GREEN-DRT est formalisé de la manière suivante :

$$E_{tot} = \sum E_{sec}$$

où

E_{tot} : est la quantité globale de polluants émise sur le territoire, en grammes,

E_{sec} : est le total des émissions produites sur le tronçon sec , en grammes.

$$E_{sec} = \sum_k E + E_{cold} + E_{acc}$$

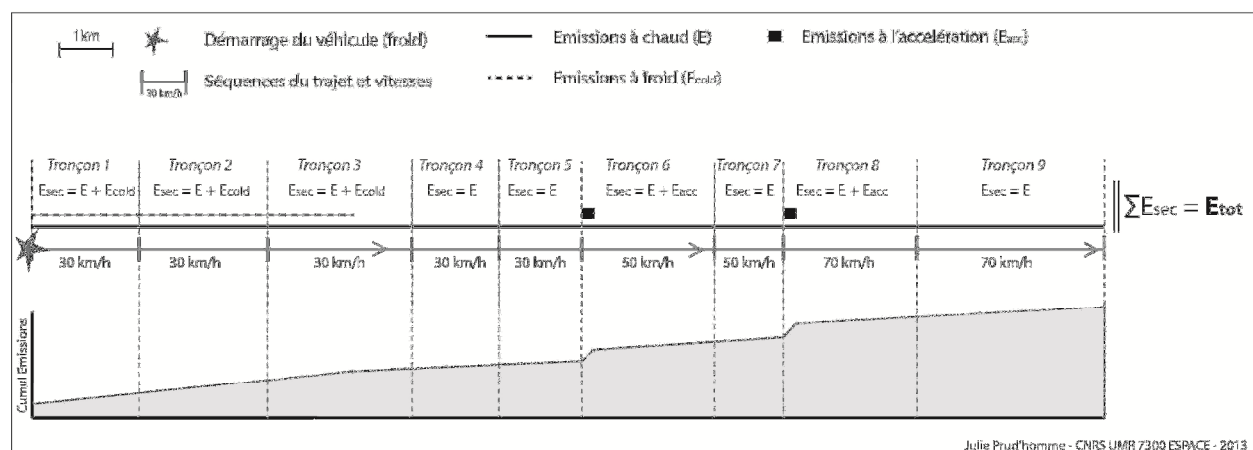
où

E : la quantité de chaque polluant k émis dans le contexte de circulation « à chaud »,

E_{cold} : la quantité de chaque polluant k émis dans le contexte de circulation « à froid »,

E_{acc} : la quantité de chaque polluant k émis lors des accélérations.

Figure 22. Trajet et calcul des émissions à l'échelle du tronçon



a. Émission à chaud

Le calcul des émissions que nous appelons « à chaud » ici, est adapté du modèle COPERT (Ntziachristos et Samaras, 2009) (voir « Calcul des émissions en circulation (E_{HOT}) » p. 101). Le calcul est fait à partir des caractéristiques de chaque tronçon.

$$E = \sum D_{V,j} \times e_{V,j,k}$$

où

$D_{V,j}$: la longueur du tronçon de route j , emprunté par le véhicule V ;

$e_{V,j,k}$: le facteur d'émission du polluant k , selon la vitesse pratiquée sur le tronçon j par le véhicule V . Ils sont présentés dans l'Annexe 1 (p. 243).

b. Surémission

- Surémission à froid

Les émissions à froid sont calculées comme une quantité de polluants liée à la température ambiante et à la vitesse de circulation. Dans GREEN-DRT, on répartit cette quantité de polluants linéairement sur les 6 premiers kilomètres du trajet nécessaires au réchauffement du moteur. Si les 6 km se finissent au milieu d'un tronçon, on attribue les émissions proportionnellement à la distance concernée sur le dernier tronçon et non par rapport à la longueur totale du tronçon.

Nous adoptons la modélisation proposée dans MEET (Hickman *et al.*, 2003) (voir « Intégration des surémissions au démarrage (E_{COLD}) » p. 99). Nous la rappelons ici :

$$E_{COLD} = \omega \times [f(V) + g(T) - 1] \times h(d)$$

où

ω : la surémission de référence (à 20°C et 20 Km/h) ;

V : la vitesse moyenne en km/h pendant la période froide ;

T : la température en degré °C (la température ambiante pour un départ à froid) ;

d : la distance parcourue ;

$h(d)$: un correcteur de la distance si le trajet est plus court que la distance nécessaire pour que le moteur atteigne la température idéale ;

$f(V)$: le correcteur de la constante de référence par la vitesse moyenne selon le type de véhicule et le type de carburant, de la forme $f(V) = a V + b$;

$g(T)$: le correcteur de la constante de référence par la température ambiante selon le type de véhicule et le type de carburant, de la forme $g(T) = a T + b$.

(détails dans l'Annexe 3 p. 250)

- Surémission à l'accélération

À chaque changement de vitesse entre deux tronçons de route successifs d'un trajet, on calcule les émissions provoquées par l'accélération¹³. Nous avons pour cela adapté la modélisation proposée dans (Int Panis, Broekx et Liu, 2006).

$$E_n(t) = \max[E_0, f1 + f2 v_n(t) + f3 v_n(t)^2 + f4 a_n(t) + f5 a_n(t)^2 + f6 v_n(t)a_n(t)]$$

où

f : les coefficients spécifiques à chaque type de véhicule (n) et chaque polluant, (voir Annexe 4 p. 251) ;

v : la vitesse instantanée, en km/h ;

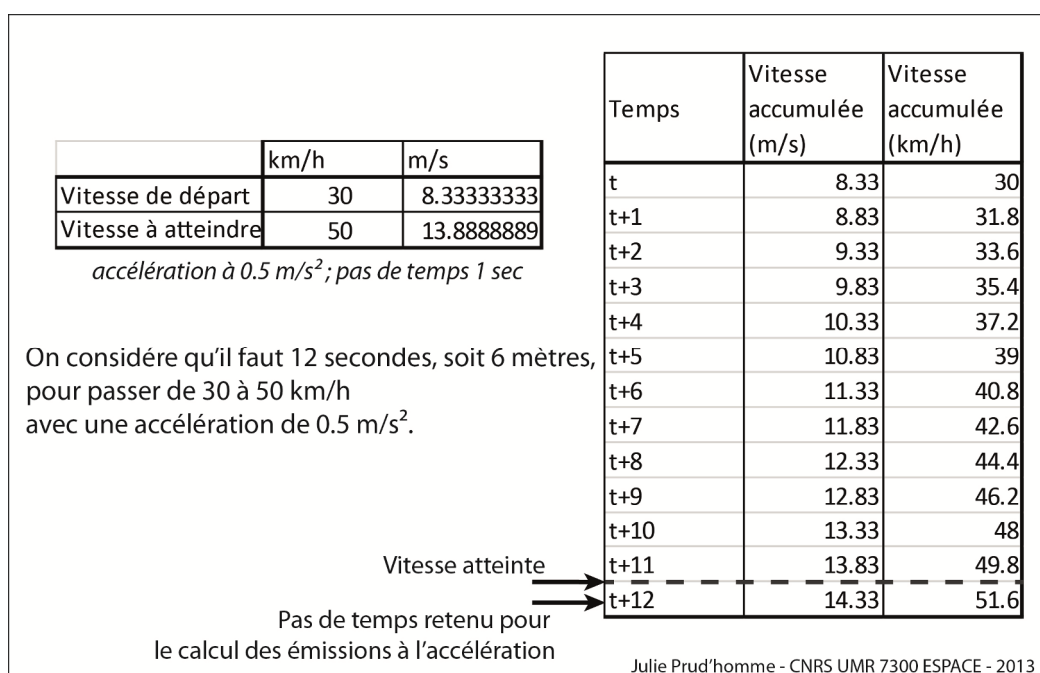
a : l'accélération instantanée, en m/s² ;

t : le temps auquel le calcul est effectué.

On considère que l'accélération est homogène en intensité. Dans GREEN-DRT, on calcule les surémissions à chaque seconde jusqu'à atteindre la vitesse voulue (V_2). En appliquant l'accélération de manière linéaire, on obtient rarement la valeur V_2 exacte, mais une valeur approchante. On conserve alors le dernier pas de temps pour calculer les émissions, comme illustré ci-dessous (Figure 23).

¹³ La décélération étant une accélération négative, nous ne distinguons pas les deux cas dans le discours.

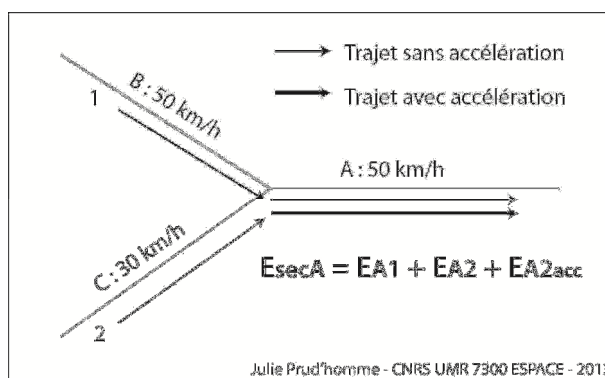
Figure 23. Illustration du calcul des surémissions à l'accélération dans GREEN-DRT



L'intensité de l'accélération n'est pas contrainte par le modèle, elle peut être adaptée aux différents scénarios.

Le calcul des surémissions est contextuel, il ne peut être effectué indépendamment de la prise en compte du détail du trajet effectué par le véhicule. En effet, selon le séquençage des tronçons au cours du trajet, il peut porter, ou non, des surémissions. Selon le trajet, un même tronçon ne sera pas emprunté dans les premiers kilomètres. Une surémission à froid surviendra au niveau de ce tronçon seulement pour certains trajets. De la même manière, à une intersection, la vitesse associée à chaque tronçon n'est pas forcément identique. Selon la vitesse pratiquée sur le tronçon qui mène le véhicule à l'intersection, un même tronçon provoquera une accélération ou non (Figure 24). Dans le cas présenté, on calcule une accélération (+20 km/h) sur le tronçon A pour le trajet 2, mais pas pour le trajet 1. Cette distinction ne peut se faire qu'avec l'analyse de l'historique de la composition du trajet.

Figure 24. Importance de l'historique de la composition du trajet dans le calcul des émissions



B. Sensibilité du modèle d'émission aux différents paramètres

Les paramètres de vitesse, de température ambiante ou encore d'intensité d'accélération entrent en jeu dans les émissions de polluants. La vitesse influe sur les quantités de polluants émises quel que soit le contexte considéré. De plus, selon les substances, elle n'a pas le même impact. Nous proposons dans cette partie de comparer les impacts de chaque paramètre impliqué sur le comportement des différents polluants, dans chaque contexte de circulation. Les valeurs indiquées dans cette partie sont directement tirées de GREEN-DRT. Ce sont donc celles qui sont utilisées pour le calcul des émissions dans ce travail.

a. Influence de la vitesse sur les émissions à chaud

Comme nous l'avons détaillé précédemment, la vitesse agit sur les quantités de polluants émises autant lors de la circulation « à chaud » que lors des surémissions (circulation à froid et accélérations). La distance pondère linéairement les émissions à chaud, alors que ces mêmes émissions varient selon la vitesse de circulation. Elles varient également selon les types de véhicule et le type de carburant. La Figure 25 qui suit présente le comportement de chaque polluant et de la consommation selon ces trois variables.

Dans la Figure 25.a., on remarque un comportement similaire de la consommation de carburant quel que soit le type de véhicule et le carburant. Les véhicules essence consomment globalement plus que les véhicules diesel. On observe une décroissance forte de la consommation entre 0 et 30 km/h suivie d'une décroissance faible jusqu'à 80 km/h. Une légère augmentation de la consommation est observée pour les vitesses supérieures. On note que les véhicules diesel montrent une augmentation

légèrement plus rapide dans les plus grandes vitesses. Les différences de consommation dans les vitesses les plus faibles sont marquées. Elles vont de 150 g/km à 290 g/km avec un écart de 100 g/km entre les minibus diesel (190 g/km) et les minibus essence (290 g/km).

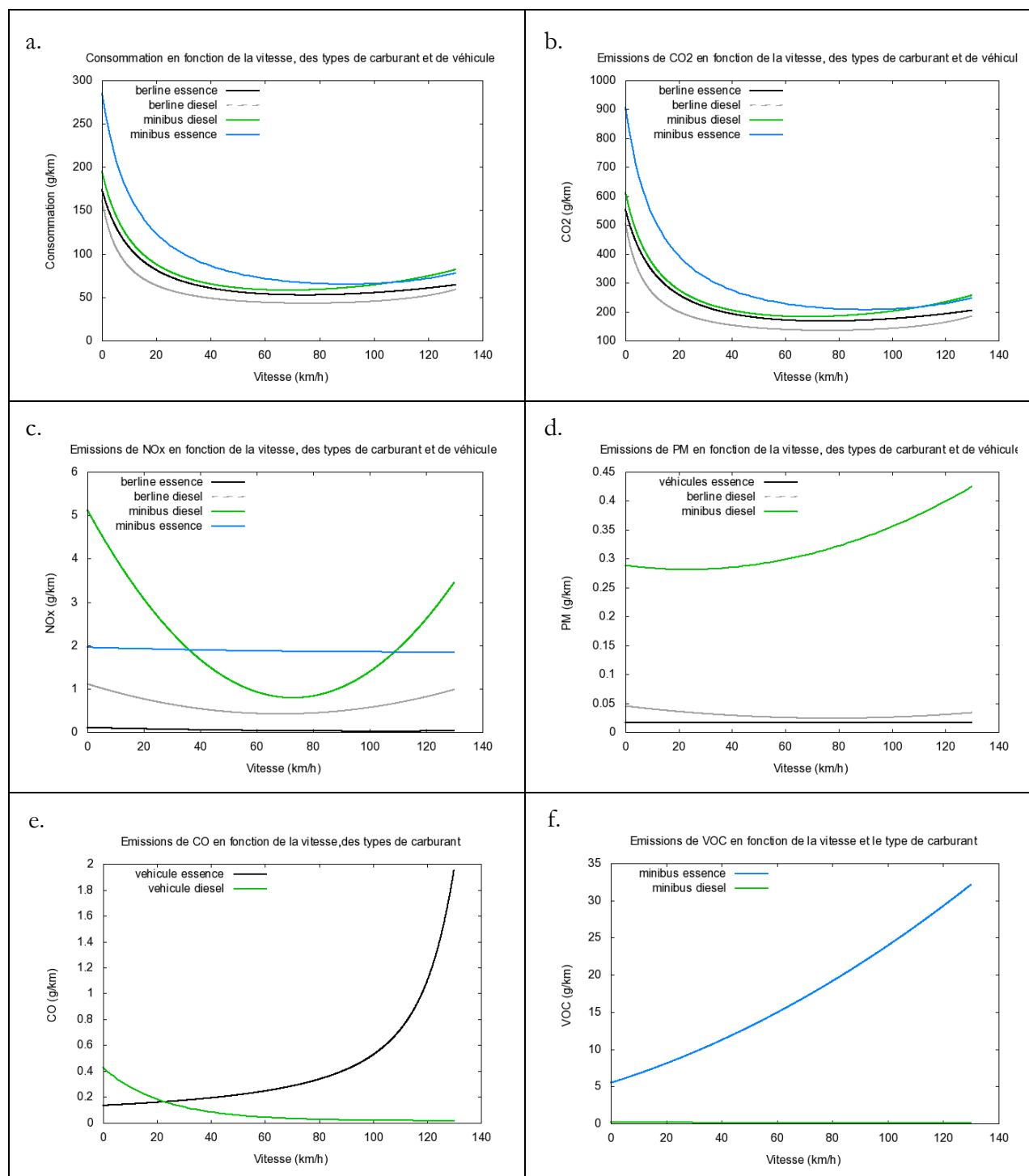
Les émissions de CO₂ (dioxyde de carbone) sont proportionnelles à la consommation quels que soient le carburant et le type de véhicule (Figure 25.b.). Les quantités de CO₂ émises dans les plus faibles vitesses vont de 90 g/km (berline diesel) à 500 g/km (minibus essence). En revanche, les NO_x (oxydes d'azote) ont des comportements très différents selon le carburant et selon les types de véhicules (Figure 25.c.). Si les émissions de NO_x par les véhicules essence sont semblables, relativement constantes selon la vitesse avec un écart de 2 g/km entre les deux, les émissions produites par les véhicules diesels sont dissemblables. Celles provenant des véhicules type berline diminuent approximativement de moitié entre 0 et 6 km/h avant d'augmenter entre 80 et 130 km/h. Les véhicules type minibus ont une émission de NO_x beaucoup plus variée selon la vitesse. De 5 g/km aux plus faibles vitesses, elles passent à 1 g/km à 70 km/h. Les émissions de NO_x augmentent ensuite jusqu'à 3.5 g/km à 130 km/h.

Les émissions de microparticules (PM – *Particulate Matter*) concernent principalement les véhicules diesel (Figure 25.d.). Les véhicules essence, quel que soit leur type, ont une émission constante selon la vitesse à 0.02 g/km environ. Les émissions de PM par les berlines diesel oscillent entre 0.05 et 0.02 g/km alors que les minibus diesel émettent entre 0.29 et 0.43 g/km de PM avec une nette augmentation à partir de 60 km/h.

Les émissions de CO (monoxyde de carbone) sont identiques selon le type de véhicule mais très différentes entre les types de carburant (Figure 25.e.). Les véhicules diesel émettent 0.4 g/km de CO aux plus basses vitesses. Les émissions diminuent jusqu'à tendre vers 0, avec un premier intervalle de vitesse [0 ; 40] où la diminution des quantités de CO est notable. En revanche, bien que les véhicules essence émettent moins de CO aux faibles vitesses que les véhicule diesel, à partir de 20 km/h cela s'inverse et les émissions de CO par les véhicules essence augmentent lentement jusqu'à 100 km/h (de 0.15 à 0.4 g/km) avant de croître très rapidement jusqu'à 2 g/km à 130 km/h.

Les Composés Organiques Volatiles (COV, *VOC en anglais*) ne concernent que les minibus (Figure 25.f.). Les minibus diesel n'en émettent que très peu alors que les émissions de COV par les minibus essence ne font qu'augmenter, de 5 g/km aux plus faibles vitesses jusqu'à 32 g/km à 130 km/h.

Figure 25. Comportement des émissions à chaud des différents polluants selon la vitesse

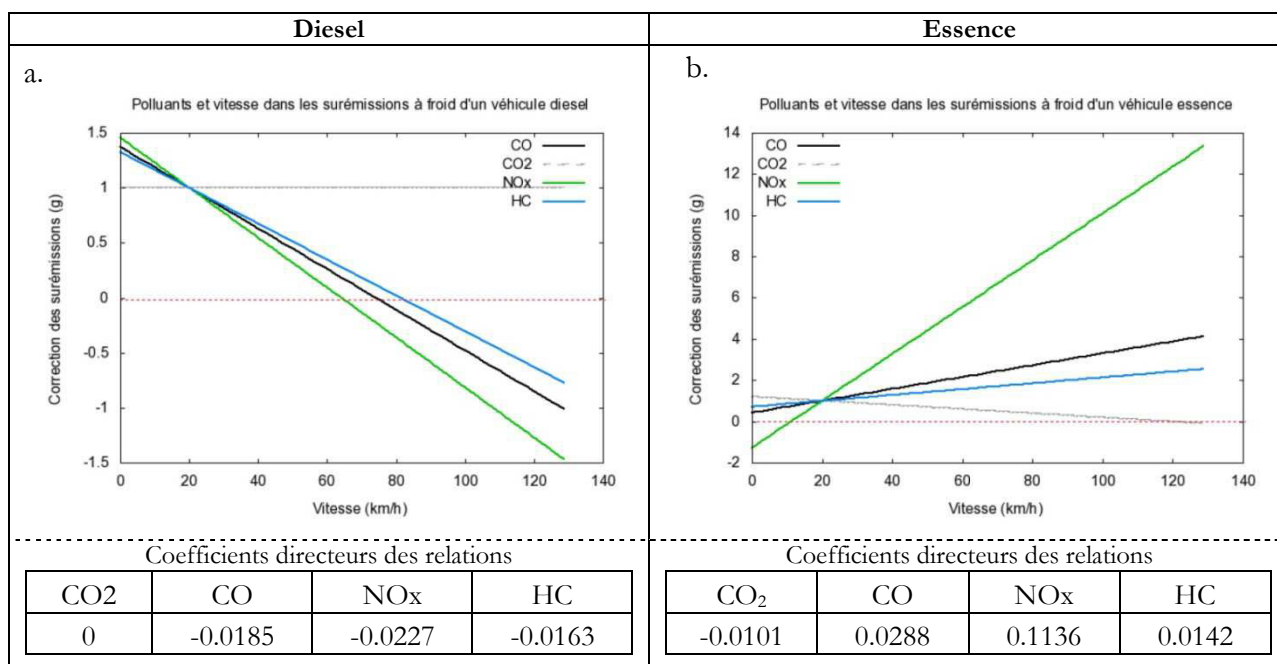


b. Influence de la température ambiante et de la vitesse sur les surémissions à froid

Les surémissions à froid sont sensibles à la température ambiante et à la vitesse de circulation. Pour rappel, leur calcul est effectué par la correction d'une valeur « standard » établie à une vitesse de 20 km/h et une température de 20°C. Elle est donc corrigée en fonction de la température ambiante et en fonction de la vitesse pratiquée. Nous explorons ici le comportement de chaque polluant à la variation de ces deux paramètres de correction selon le carburant. Tous les polluants sont émis proportionnellement à la vitesse ou selon la température (fonctions affines). Nous regardons principalement le coefficient directeur de chaque relation pour déterminer leur sensibilité. Les valeurs d'émissions négatives indiquent que la valeur standard de surémission à froid est diminuée et inversement pour les valeurs positives.

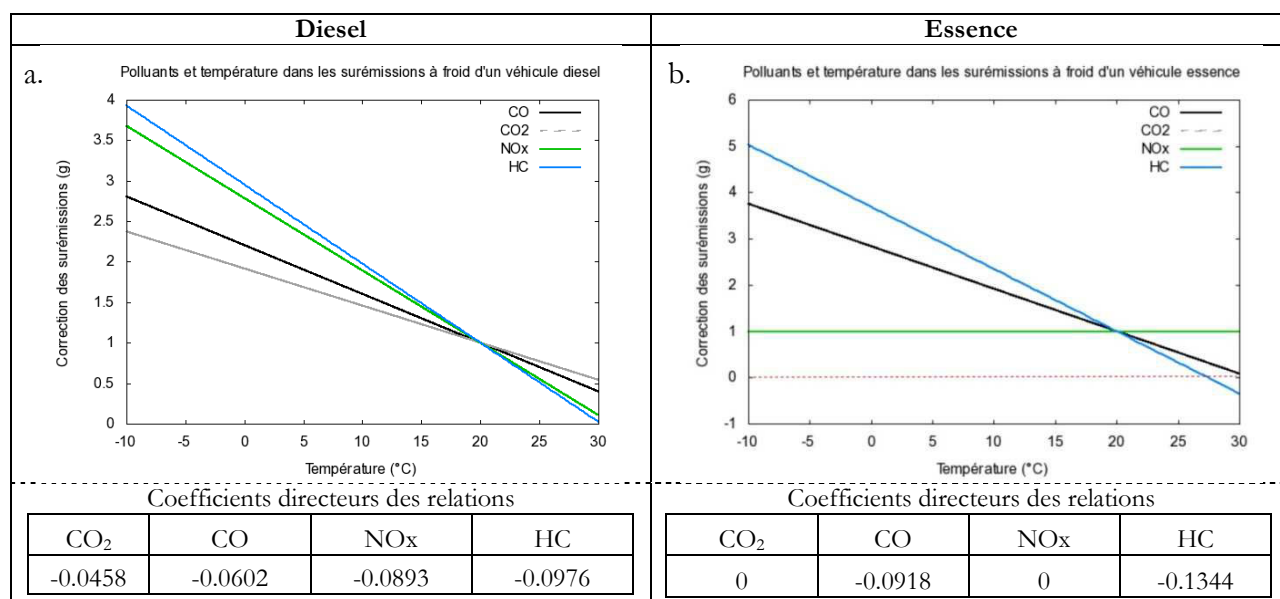
La vitesse pratiquée (entre 0 et 100 km/h) a un effet positif sur les surémissions produites par les véhicules diesel (Figure 26.a.). Excepté pour le CO₂ qui n'est pas impacté, tous les autres polluants se réduisent avec la vitesse. À partir de 70 km/h en moyenne, le correcteur est positif. Les surémissions sont donc réduites, notamment pour le NO_x (coef.=-0,02). Dans le cas des véhicules essence (Figure 26.b.), la tendance est inverse. Excepté pour le CO₂ qui diminue légèrement avec la vitesse (coef.=-0,01), la valeur de la correction des polluants augmente avec la vitesse, les surémissions augmentant de la même manière.

Figure 26. Comportement des différents polluants en fonction de la vitesse et du carburant dans les surémissions à froid



De la même manière, la température a un effet non négligeable sur les surémissions à froid. Que ce soit pour les véhicules diesel (Figure 27.a.) ou essence (Figure 27.b.), la valeur des corrections diminue avec l'augmentation de la température (de -10 à 30 °C). Seuls le CO₂ et le NO_x sont constants en fonction de la température dans le cas des véhicules essence. Quel que soit le carburant, les hydrocarbures (HC, un COV) sont les plus sensibles à la variation de la température ambiante (coef. diesel = -0,01 ; coef. essence = -0,13). En outre, il faut que la température dépasse 30 °C pour que la valeur standard soit diminuée par ce correcteur.

Figure 27. Comportement des différents polluants en fonction de la température et du carburant dans les surémissions à froid



Prud'homme, El Asri - 2013

c. Influence de l'intensité de l'accélération sur les surémissions

Pour rappel, une décélération est une accélération négative. Ainsi, une décélération de 0,2 m.s⁻² est équivalente à une accélération de -0,2 m.s⁻². L'intensité de l'accélération (et décélération) correspond à la valeur absolue de la mesure. Plus celle-ci est importante, plus l'intensité est forte. Elle correspond à la rapidité avec laquelle le véhicule passe d'une vitesse à une autre.

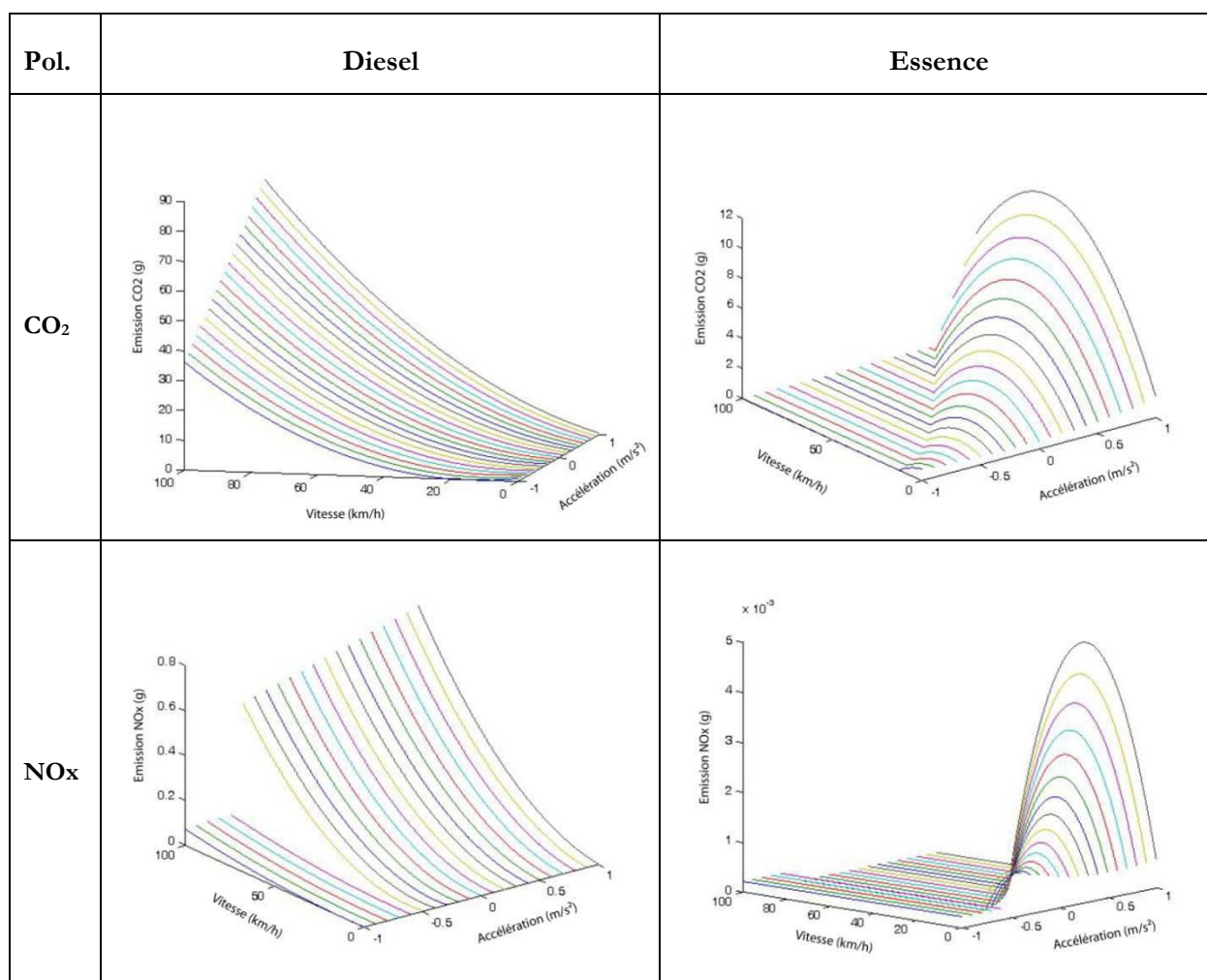
Les surémissions à l'accélération varient selon l'intensité de l'accélération et la vitesse à laquelle l'accélération intervient. Le comportement de chaque polluant selon ces deux variables et selon le carburant est présenté dans la Figure 28.

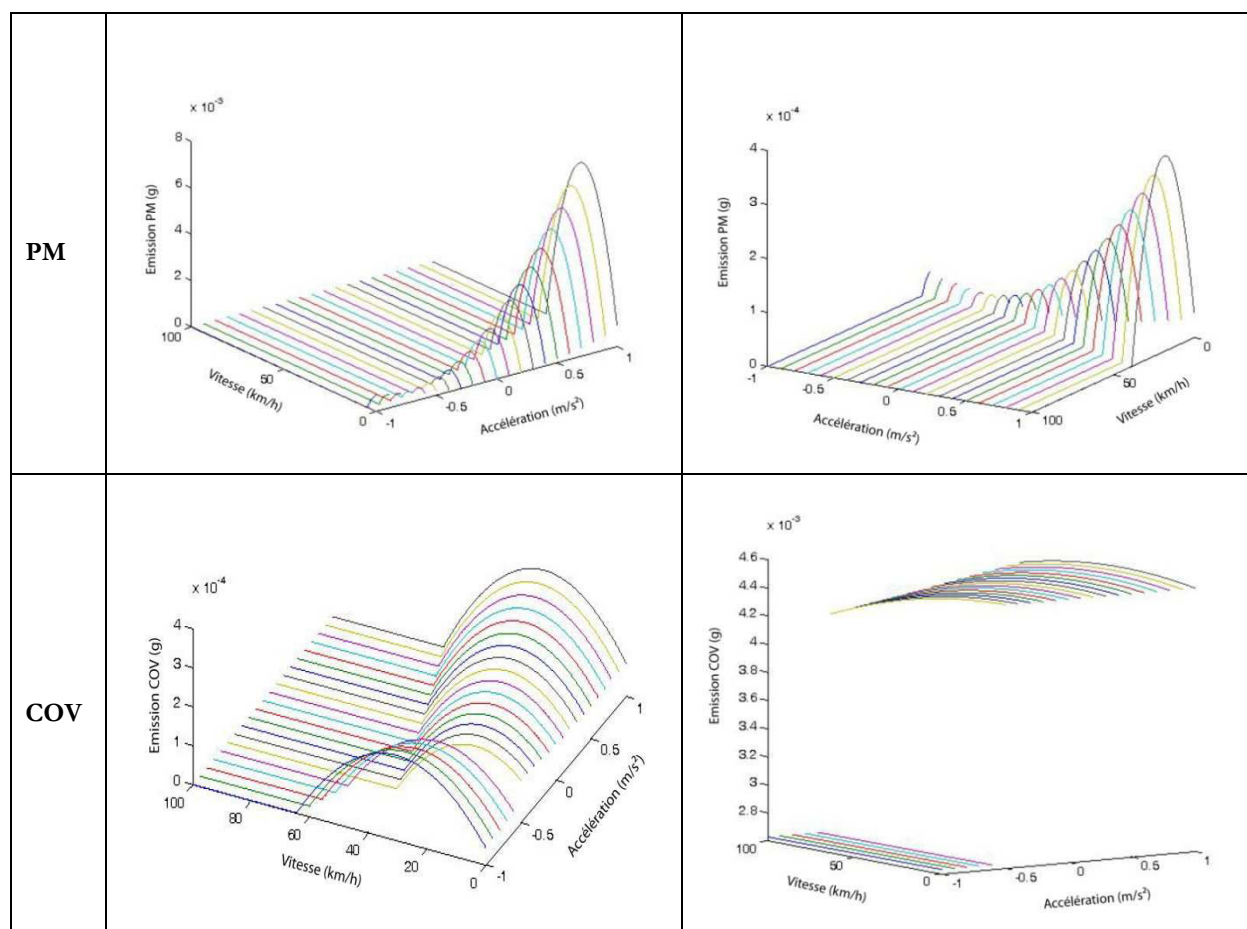
Les surémissions de CO₂ dues à l'accélération sont très différentes selon le carburant. Dans le cas des véhicules diesel, elles augmentent avec la vitesse et avec l'intensité de l'accélération. Par contre, dans le cas des véhicules essence, les surémissions surviennent surtout pour les vitesses autour de

60 km/h et pour des accélérations de forte intensité. Dans le cas des surémissions de NOx par des véhicules diesel, on observe des surémissions à partir d'une accélération d'intensité de $-0,5 \text{ m.s}^{-2}$ et qui augmentent avec la vitesse. Par contre, les surémissions de NOx à l'accélération par les véhicules essence surviennent principalement pour des accélérations de forte intensité, entre $0,5$ et 1 m.s^{-2} . Elles concernent seulement les vitesses situées entre 0 et 40 km/h. Pour les surémissions de PM, véhicules diesel et essence ont un comportement très similaire. Elles concernent seulement les vitesses qui se situent entre 0 et 30 km/h, avec une augmentation selon l'intensité de l'accélération. Pour finir, les surémissions de VOC ont un comportement très particulier, notamment pour les véhicules diesel. On observe des surémissions à une accélération située entre -1 et $-0,5 \text{ m.s}^{-2}$, pour des vitesses comprises entre 0 et 60 km/h ainsi que pour des accélérations entre $-0,3$ et 1 m.s^{-2} pour des vitesses entre 0 et 50 km/h. Les surémissions de VOC par les véhicules essence sont relativement constantes entre $-0,5$ et 1 m.s^{-2} quelle que soit la vitesse.

Figure 28. Comportement des émissions de polluants à l'accélération
(intervalle d'intensité de l'accélération (m.s^{-2}) $[-1 ; 1]$; intervalle de vitesse (km/h) $[0 ; 100]$)

Remarque : pour des raisons de lisibilité, les axes ne sont pas systématiquement orientés de la même manière.





Prud'homme, El Asri - 2013

Globalement, les surémissions à l'accélération sont plus importantes pour les accélérations positives, sauf dans les cas des COV émis par des véhicules diesel. De plus, elles surviennent principalement à des vitesses inférieures à 50 km/h, sauf pour le CO₂.

Dans des conditions de vitesse constante sur les tronçons que l'on considère dans ce travail, le nombre d'accélérations à des vitesses faibles (entre 0 et 30 km/h) est réduit aux seuls démarrages/redémarrages. Les accélérations modélisées dans ce travail surviennent principalement entre des vitesses de circulation supérieures à 30 km/h. La part des surémissions de NO_x, PM et CO qui se produisent à des faibles vitesses en est minimisée. En revanche, les surémissions de CO₂ sont largement considérées, se produisant majoritairement entre des vitesses autour de 60 km/h. C'est un biais que ne n'avons pas les moyens d'évaluer dans ce travail et que nous devons garder à l'esprit lors de l'analyse des résultats.

C. Développements particuliers dans GREEN-DRT

L'adaptation de COPERT IV dans GREEN-DRT a nécessité le développement de modules particuliers. Le contexte de simulation de GREEN-DRT permet de configurer le véhicule que l'on veut employer pour chaque scénario. On a donc mis en place un générateur de véhicules virtuels. Il permet le choix de plusieurs caractéristiques :

- le type de véhicule, lié au poids du véhicule et à sa capacité en nombre de passagers ;
- le carburant.

Ce générateur peut permettre l'utilisation de véhicules variés, de la citadine au bus, en passant par les poids lourds ou encore les deux roues motorisés.

La multitude de possibilités de scénarios sur un même réseau et la nécessaire considération du contexte de chaque tronçon de route au sein d'un trajet font qu'il n'est pas possible de calculer les émissions relatives à un tronçon *a priori*. En effet, la flexibilité de GREEN-DRT repose sur l'utilisation d'un générateur de polynômes pour le calcul des émissions. Les facteurs d'émissions de chaque polluant relatif aux différents contextes d'émissions, selon les différents types de véhicules, sont implémentés et les polynômes pour le calcul des émissions sont générés pour chaque scénario. On obtient ainsi pour chaque tronçon du réseau le détail des émissions produites dessus lors d'un trajet. On est alors en capacité d'accumuler les émissions à différents niveaux. Si lors d'un trajet, ou d'une simulation, un même tronçon est emprunté plusieurs fois, que ce soit le même véhicule ou non, les contributions de tous sont additionnées.

Le tableau qui suit (Tableau 6) résume les différences notables entre les modèles MEET / COPERT IV et GREEN-DRT. Elles relèvent principalement du fait que GREEN-DRT s'inscrit dans une simulation de déplacements, ce qui permet de maîtriser tous les éléments en entrée et ainsi que la granularité d'analyse des parcours.

Tableau 6. Différences de contexte entre les modèles d'émission COPERT IV/MEET et GREEN-DRT

	COPERT IV/MEET	GREEN-DRT
Contexte des modèles	Tous véhicules circulant dans un espace donné	Véhicules mobilisés pour répondre à une demande de déplacements précise (<i>TAD ou VP</i>)
Hypothèses initiales	On ne connaît pas la flotte <i>a priori</i> : Estimation de la flotte de véhicules circulant dans un espace donné (<i>proportions moyennes de types de véhicules</i>)	On connaît la flotte <i>a priori</i> : Simulations d'optimisation de services de TAD Attribution d'un véhicule par demande de déplacement VP
Échelle temporelle	Estimations à l'année	Calculs à la tournée
Échelle spatiale	Réseau du territoire étudié	Tronçon de route
Séquençage des déplacements (pour un véhicule)	Départ → Arrivée	Départ du dépôt de véhicules → Récupération Client 1 → Récupération Client 2 → Dépôt Clients 1 & 2 → Récupération Client 3 → ... → Retour au dépôt de véhicules
Prise en compte du réseau routier dans le calcul des émissions en circulation	Proportion de chaque type de route emprunté par un certain nombre de véhicule d'un même type	Détail de chaque tronçon utilisé par chaque véhicule avec l'information sur le type de route et séquençage de ceux-ci

Le modèle GREEN-DRT permet ainsi d'estimer les polluants produits sur chaque tronçon et de les accumuler à l'échelle voulue (tronçon, trajet, simulation). Comme le modèle a été élaboré en premier lieu pour évaluer les performances des TAD, nous avons assorti les informations sur les émissions de polluant de différentes statistiques sur l'efficacité des services (Tableau 7). Un TAD n'est compétitif par rapport à l'utilisation du véhicule personnel (VP) que s'il conserve des qualités de service suffisantes. Un système de TAD, qui serait du point de vue des émissions de polluants, plus économe qu'un autre ne sera pas forcément compétitif du point de vue du service (des temps de voyage trop augmentés par exemple). Ainsi, nous évaluons la différence de temps entre la tournée TAD et l'usage du VP pour les mêmes déplacements (Tableau 7.1), nous calculons la densité de clients dans les véhicules au cours d'une tournée en pondérant le nombre de clients dans les véhicules par la distance parcourue (Tableau 7.3). Nous calculons la distance parcourue à vide et les émissions ainsi produites lors de chaque tournée, une conséquence inévitable de l'utilisation des TAD. Nous proposons également une statistique sur les émissions unitaires (Tableau 7.2), c'est-à-dire la quantité de polluants émise attribuée à chaque voyageur, en fonction du partage du véhicule avec d'autres passagers. Elle est calculée d'une part en « partageant » les émissions produites par les distances parcourues par le véhicule à vide, inhérentes au fonctionnement du service, entre tous les clients de la tournée considérée (Tableau 7.2a) et d'autre part en répartissant les émissions de chaque tronçon produites lorsque le véhicule transporte des clients entre eux (Tableau 7.2b). On obtient la moyenne des émissions unitaires d'une tournée en additionnant les deux indices précédents (Tableau

7.2c). L'indice VPK (voyageurs par kilomètre) est une mesure classique des transporteurs (Tableau 7.4). Elle permet d'apprécier le taux de regroupement de manière plus globale. Les statistiques sur le taux de remplissage des véhicules et sur les émissions unitaires sont calculées pour chaque tournée. On en calcule la moyenne pour obtenir la valeur à l'échelle d'une simulation.

Tableau 7. Statistiques sur le fonctionnement de service de TAD

	Statistique	Équation	Description
1	Temps usager ajouté TAD vs VP (mn)	$\Delta T = T_{TAD} - T_{VP}$	T_{TAD} : temps usager avec TAD (mn) T_{VP} : temps usager avec VP (le plus optimisé) (mn)
2a	Émissions unitaires moyennes à vide dans une tournée (g)	$E_{unitaire\ vide} = \frac{\sum E_{sec\ vide}}{Nb\ clients\ tournée}$	$E_{sec\ vide}$: émissions produites sur le tronçon (g) à vide ; $E_{sec\ plein}$: émissions produites sur le tronçon (g) avec des passagers ;
2b	Émissions unitaires moyennes véhicule plein dans une tournée (g)	$E_{unitaire\ plein} = \sum_{sec} \frac{E_{sec\ plein}}{Nb\ client_{sec}}$	$nbclient_{tournée}$: nombre total de clients dans la tournée ; $nbclient_{sec}$: nombre de clients dans le véhicule lors du passage sur le tronçon sec ;
2c	Émissions unitaires moyennes par tournée (g)	$E_{unitaire\ tournée} = E_{unitaire\ plein} + E_{unitaire\ vide}$	$E_{unit\ tournée}$: émission unitaire moyenne sur une tournée.
3	Densité de remplissage moyenne des véhicules (% clients transportés par tournée)	$Dens_{rempl\ tournée} = \sum_{sec} \frac{nbclient_{sec} \times L_{sec}}{L_{tournée}} \times 100$	$nbclient_{sec}$: nombre de clients dans le véhicule lors du passage sur le tronçon sec ; L_{sec} : longueur du tronçon sec ; $L_{tournée}$: longueur totale de la tournée.
4	Voyageurs par kilomètre par tournée (VPK)	$VPK_{tournée} = \frac{nbclient_{tournée}}{L_{tournée}}$	$nbclient_{tournée}$: nombre total de clients dans la tournée ; $L_{tournée}$: longueur totale de la tournée.
5	Taux de regroupement	$Tx_{regr.moy\ simu} = \frac{nbclient_{tournée}}{nb\ véhicules}$	$nbclient_{tournée}$: nombre total de clients dans la tournée ; $nb\ véhicules$: nombre de

Chapitre 7 Une chaîne de traitement pour l'évaluation des différents leviers de la performance environnementale des services de transport

Notre objectif est de calculer, globalement et sur chaque tronçon, les émissions de polluant provoquées par la circulation de véhicules sur un réseau en prenant en compte le chemin emprunté par chacun. Cela doit permettre d'obtenir une cartographie de la localisation de la production de différents polluants et substances inhérents à la combustion du carburant dans les moteurs des véhicules en circulation en réponse à une demande de déplacements. Le modèle GREEN-DRT a été développé dans ce but.

Nous détaillons ici la démarche développée spécifiquement pour les TAD, configuration de transport la plus complexe. Elle peut aisément être adaptée aux cas de l'utilisation des véhicules personnels (VP) ou du covoiturage.

Nous avons fait le choix d'utiliser autant que possible des outils et logiciels préexistants. C'est ainsi que, outre Common Lisp et LispStat, nous articulons un logiciel de Système d'Information Géographique (ArcGIS® 10 - ESRI) et un logiciel de gestion de base de données (ACCESS® 2010 – Microsoft) avec le noyau d'optimisation des tournées TAD (GaleopSys® - Prorentsoft) et le modèle d'émission GREEN-DRT. La communication entre les différents logiciels se fait avec des fichiers textes (.csv), facilement interprétables.

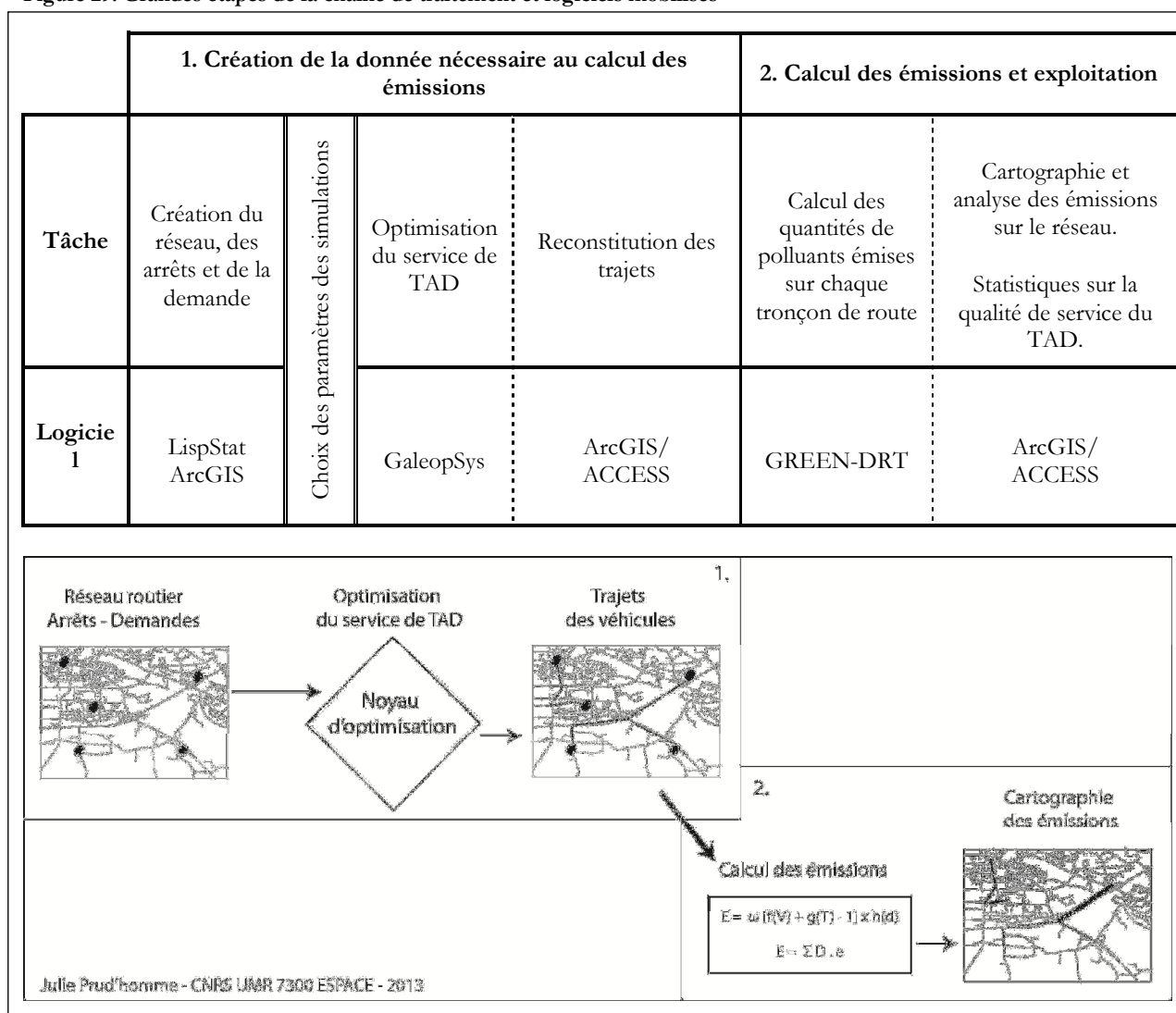
Pour arriver à nos fins, nous avons besoin de connaître la composition exacte des chemins et de la chronologie de passage sur chaque tronçon de route. Aucun logiciel ou outil actuel sur étagère ne permet d'effectuer cette tâche. Anciennement, ArcInfo® 9.x (ESRI) proposait un outil (*Route System*) qui permettait d'avoir cette information. Dans l'environnement plus ergonomique proposé par ArcGIS® 10.x, il est nécessaire de mettre en place une chaîne de traitements permettant de récupérer cette information qui est cruciale pour nous. Malgré ce manque, nous avons choisi de travailler avec ArcGIS® 10 et notamment avec l'outil d'analyse de réseaux Network Analyst® qui permet entre autres de calculer les itinéraires optimaux sur le réseau en temps ou en distance entre différentes localisations. ArcGIS est également facilement interfaçable avec une base de données stockée sous ACCESS (connexion OLE DB).

La chaîne de traitement mise en place s'articule en deux grandes phases :

1. Création de la donnée nécessaire au calcul des émissions avec GREEN-DRT ;
2. Calcul des émissions avec GREEN-DRT et exploitation des résultats.

Comme indiqué dans la Figure 29 qui suit, chacune de ces phases est composée de différentes étapes qui sont détaillées par la suite, mobilisant différents logiciels et outils. Nous verrons qu'entre chaque étape une routine en Common Lisp (CL) intervient pour formater les tables de manière à interfacer les logiciels.

Figure 29. Grandes étapes de la chaîne de traitement et logiciels mobilisés



1. Création de la donnée nécessaire pour le calcul des émissions

A. Les données en entrée

Les données en entrée de la chaîne de traitement nécessaires au calcul des émissions de polluants sont géolocalisées et sont manipulées avec ArcGIS.

a. Réseaux

Le modèle se base sur un réseau routier géoréférencé, topologique où chaque tronçon de route est valué par la vitesse de circulation maximale autorisée. Dans l'idéal, chaque objet de la base de données géoréférencée du réseau routier est un tronçon de route, c'est-à-dire une portion de route qui se situe entre deux intersections.

La source principale de données sur le réseau routier est l'IGN. Issu de la BDTopo[®], le réseau routier ne porte pas l'information sur les vitesses légales de circulation. Nous sommes uniquement informés sur la hiérarchie des routes et leur importance. C'est à partir de ces renseignements que nous estimons les vitesses associées à chaque tronçon de route selon le type de voirie.

b. Arrêts et dépôts

Quel que soit le système de TAD mis en place, il se base sur des arrêts (arrêts à arrêts) ou des adresses (porte-à-porte). Ici, nous parlerons d'arrêt quel que soit le cas de figure.

Les arrêts sont localisés sur le réseau routier. Il n'y a pas de limite au nombre d'arrêts. Ceux-ci peuvent être des points potentiels de départ des voyageurs et/ou des points d'arrivée selon les scénarios. Les TAD nécessitent également le stockage des véhicules dans des dépôts. Ceux-ci sont localisés de manière ponctuelle dans le SIG. Leur nombre n'est pas limité. Une flotte de véhicules est associée à chacun en entrée du noyau d'optimisation. Celle-ci peut être hétérogène et n'est pas contrainte en taille.

Les dépôts sont particuliers au fonctionnement des TAD. On n'en tient pas compte dans la modélisation de covoiturage ou de VP. Selon le choix des arrêts dans les scénarios, on est capable de modéliser toutes formes de services de TAD.

c. Demande

La demande de déplacement par les usagers se base sur les arrêts prédéfinis. Une demande se place autant dans l'espace que dans le temps. En effet, lors d'une réservation, le client indique les arrêts de départ et d'arrivée désirés ainsi que l'heure à laquelle il souhaite partir ou arriver. Le client ne peut fixer qu'une heure de départ ou d'arrivée mais pas les deux. Il indique également la fenêtre de temps maximal qu'il autorise. Les différents scénarios de demande conditionnent le service de TAD. La stratégie de déploiement d'un TAD est configurée avec la probabilité associée à chaque arrêt d'être une arrivée ou un départ. Par exemple, si l'on souhaite modéliser un TAD en rabattement, seuls les arrêts situés au centre de rabattement seront pondérés. Les arrêts qui sont plus en périphérie seront alors des départs potentiels. Avec cette méthode, il est possible de favoriser le départ depuis certaines zones et inversement.

Pour nos simulations, nous avons utilisé un générateur de demandes dans l'environnement LispStat, développé par D. Josselin. Les demandes sont créées à partir des probabilités de chaque arrêt d'être un départ ou une arrivée et selon des probabilités horaires de déplacement. On affecte aussi des probabilités de regroupement horaires de la demande (regroupement spontané type « famille »).

La dimension temporelle des demandes ne concerne pas les VP.

B. Traitements

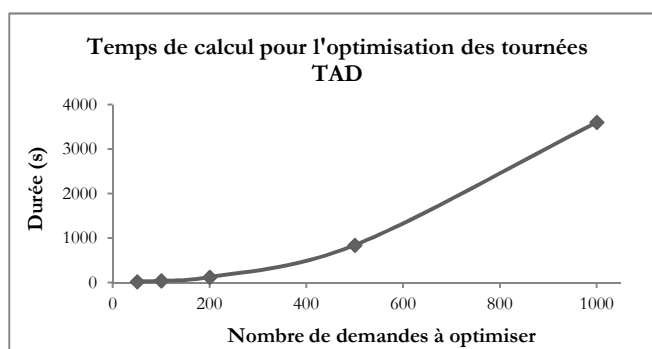
a. Optimisation des TAD

L'optimisation des tournées de TAD se fait avec le noyau d'optimisation GaleopSys[®] issu de la thèse de T. Garaix et maintenu par Prorentsoft. À partir des fichiers de demandes, de la matrice origine/destination établie sur le réseau routier et de la description de chaque dépôt de véhicules avec le détail de la flotte présente dans chaque, nous créons un fichier d'instances qui permet d'effectuer l'optimisation des tournées d'un service de TAD. L'optimisation peut techniquement être effectuée pour n'importe quelle quantité de demandes mais le temps de calcul croît de manière exponentielle avec celle-ci. Comme on peut le voir dans le Tableau 6 qui suit, si un quart d'heure suffit pour l'optimisation de 500 demandes, une heure est nécessaire pour en optimiser 1 000. La limite d'utilisation de cet outil relève donc des temps de calcul mais reste raisonnable compte tenu des volumes de demandes observés sur le terrain dans ce type de services (moins de 500 requêtes simultanées). La rapidité de calcul pourrait être largement améliorée avec des processeurs plus

puissants ou par la parallélisation des calculs. Cependant, ce n'est pas l'objet de cette thèse, d'autant plus que 1 000 mobilités journalières constituent déjà une quantité importante de demandes pour des transports type TAD, captant des marchés relativement limités (de l'ordre de quelques pourcents des flux).

Tableau 8. Durée approximative de l'optimisation par le noyau selon le nombre de déplacements

Nombre de déplacements à optimiser	Durée approximative de l'optimisation
50	20 sec
100	40 sec
200	2 mn
500	14 mn
1000	1 heure



Une fois l'optimisation exécutée, le fichier en sortie indique la succession des arrêts au sein de chaque tournée mais nous n'avons pas d'information sur les chemins empruntés pour relier chaque arrêt. Cette étape ne concerne pas les VP.

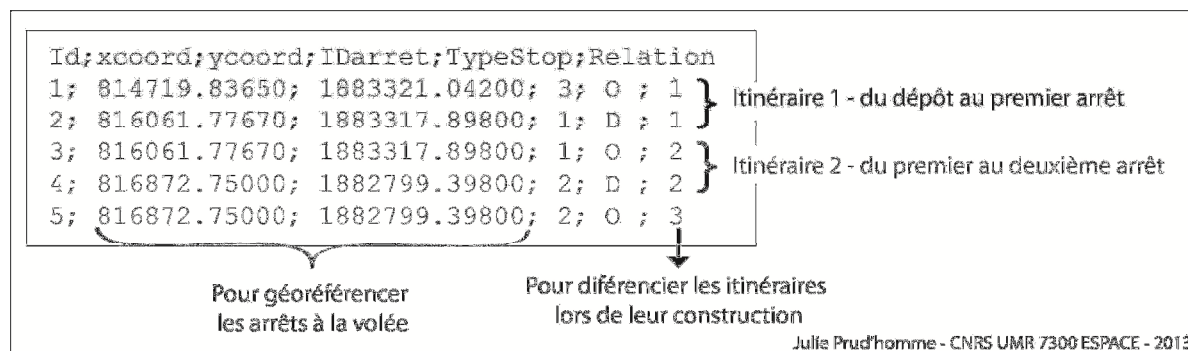
b. Reconstitution des tournées sur le réseau

Pour obtenir le détail des tronçons de route empruntés et leur séquençement, on utilise l'outil Network Analyst[®] (NA) d'ArcGIS[®] et plus particulièrement la création d'itinéraires entre différents arrêts.

Pour cela, il faut commencer par transformer le fichier en sortie du noyau (fichier solution) de manière à ce que la donnée soit exploitable par ArcGIS. En effet, l'outil de création d'itinéraire étant développé dans un objectif d'optimisation de livraison, il n'est pas « autorisé » qu'un même véhicule passe plusieurs fois par le même point, or dans le contexte d'un TAD, il est tout à fait possible que deux clients souhaitent se rendre au même endroit, à différents horaires et qu'un même véhicule se charge des deux courses. Il est donc nécessaire d'individualiser chaque étape de chaque tournée. On considère donc une tournée comme une succession d'itinéraires entre deux arrêts. Chaque déplacement est ainsi dessiné sur le réseau. On connaît alors le détail des tronçons de route utilisés et leur succession, élément primordial pour le calcul des émissions produites sur chaque tronçon. Comme nous l'avons vu précédemment, selon la position du tronçon dans la totalité du parcours, des surémissions de polluants peuvent survenir.

Il faut donc constituer des fichiers dans lesquels chaque partie de chaque tournée est individualisée. La Figure 30 qui suit présente la structure des fichiers nécessaire pour pouvoir dessiner les itinéraires, étapes de chaque tournée. On construit de la sorte un fichier par tournée de TAD.

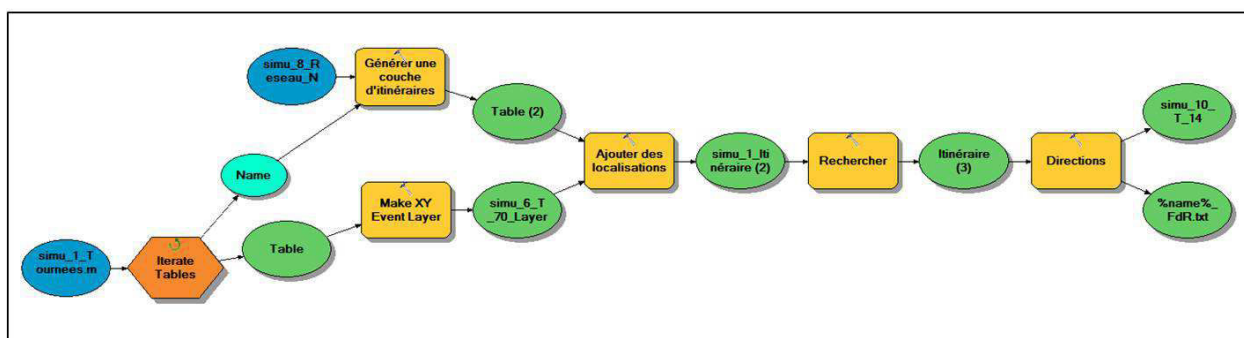
Figure 30. Structure du fichier et usage pour dessiner les itinéraires



Pour automatiser ce traitement, on a créé un ModelBuilder itératif (Figure 31) qui, grâce à une connexion OLE DB avec une géodatabase stockée dans Access dans laquelle tous les fichiers de tournées sont chargés, nous permet de traiter tous les fichiers voulus par lot. Tous les fichiers ne concernant pas les mêmes réseaux routiers (différents scénarios de vitesse sur un même réseau, différents réseaux), il est nécessaire de modifier le réseau sur lequel les itinéraires sont créés en y associant les fichiers de tournées relatifs.

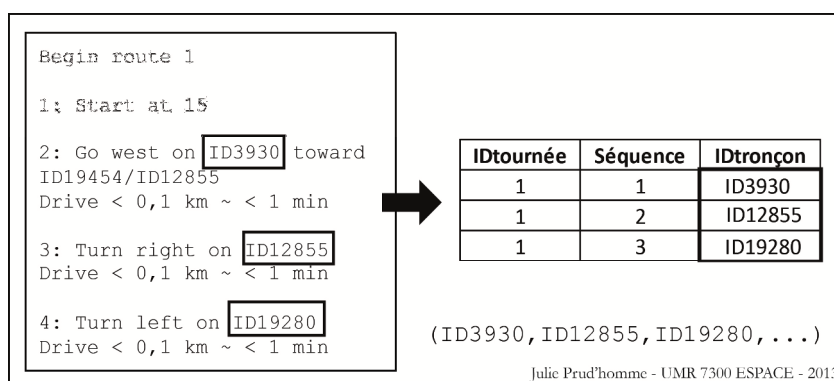
Le code Python correspondant est présenté dans l'Annexe 5 (p. 252).

Figure 31. ModelBuilder itératif pour la construction des tournées



Le calcul des émissions se faisant en-dehors d'ArcGIS, une fois l'information créée il faut l'exporter en-dehors du logiciel. La solution proposée a été de publier des « Feuilles de route » en fichier texte (.txt). Effectivement, ces fichiers indiquent successivement les noms des rues/routes à utiliser pour un trajet qui serait une livraison par exemple. On détourne ce fichier de son utilisation première en indiquant à la place des noms de rue, les identifiants des tronçons. On isole alors les identifiants des tronçons empruntés par les véhicules en conservant leur ordre de passage depuis les feuilles de routes (Figure 32) grâce à un traitement automatisé des fichiers.

Figure 32. Traitement d'une feuille de route



2. Le calcul et la cartographie des émissions

Une fois que les données relatives au séquençement des tronçons empruntés dans chaque tournée sont regroupées dans une liste, on peut calculer les émissions de polluants provoquées par le fonctionnement du service, en réponse à la demande de déplacements, avec GREEN-DRT. L'identifiant de chaque tronçon est utilisé pour en obtenir les caractéristiques (distance, vitesse autorisée), utilisées pour le calcul des émissions de « circulation ». Le séquençement des tronçons permet d'identifier les changements de vitesse légale, considérée ici comme pratiquée, entre deux tronçons consécutifs dans le parcours, moments où l'on accélère. On calcule alors la surémission liée, comme décrit dans la partie « Intégration des surémissions au démarrage (E_{COLD}) (p. 99). Pour finir, on calcule, sur les tronçons qui composent approximativement les six premiers kilomètres parcourus, la surémission à froid. On peut alors à loisir accumuler les émissions produites par un scénario de circulation des véhicules sur chaque tronçon, calculer des statistiques sur les émissions et sur le service de transport en lui-même *a volo*. On obtient ainsi pour chaque tronçon du réseau routier étudié les émissions produites dessus pour répondre aux besoins de déplacement quel que soit le mode de transport (TAD, covoiturage, VP) (Tableau 9).

Tableau 9 : Exemple d'attributs des tronçons après le calcul des émissions

IDtroncon	IDsimu	Émissions totales	Émissions chaud	Émissions froid	Émissions accélération	Total CO	Total CO2	Total NOx	Total PM	Total VOC
ID35	3	1333.90	614.27	373.57	346.055	6.3	1317.95	6.30	0.77	2.56
ID45	3	567.65	215.19	0	352.458	0.07	565.45	1.59	0.39	0.13

En liant cette table des tronçons comprenant le total des émissions produites (et sous-totaux par polluant) sur chacun au fichier géographique du réseau via l'identifiant du tronçon, on est capable de cartographier ces émissions.

Les routes étant parfois très proches spatialement et dans un objectif de standardisation statistique des résultats (1 kilogramme de polluants émis sur 5 km ne signifie pas la même chose que 1 kilogramme sur 10 km), on effectue une représentation des émissions en additionnant les émissions produites sur les portions de routes contenues dans les limites de chaque cellule d'une grille régulière. On utilise pour cela l'outil « Densité de ligne » de Spatial Analyst[®]. On peut ensuite calculer les différences locales d'émissions de polluants entre deux scénarios sur un même réseau : différences entre deux modes de transport ; différences entre deux scénarios de vitesse.

L'ensemble des informations traitées dans la chaîne permet la création de cartes d'émission de polluants à l'échelle du tronçon de route en fonction de différents critères : demandes de mobilité, type de véhicule, type de carburant, scénarios de vitesses sur le réseau, etc. Le Tableau 10 résume la chaîne de traitement avec les temps de calcul approximatifs de chaque étape. Ce tableau regroupe les étapes nécessaires pour calculer les émissions de polluants provoquées par le fonctionnement d'un service de TAD. Ce sont les mêmes pour la modélisation d'un système de covoiturage optimisé. En revanche, pour modéliser l'usage des VP, on passe directement de l'étape 4 à l'étape 8. L'étape de dessin des tournées dans ArcGIS est la plus longue. Il est possible d'optimiser un peu le temps de calcul en traitant plusieurs simulations en parallèle. Cette solution est limitée par les capacités de l'ordinateur utilisé, notamment par les capacités du processeur (calcul de 4 simulations simultanément avec un processeur Intel core i5 : utilisation de 100% du CPU).

Tableau 10. Récapitulatif des étapes de traitement et durée approximative de chacune

Étapes	Tâche	Logiciel(s)	Entrée	Sortie	Temps de traitement
1	Calibrage du réseau routier	ArcGIS®	BDTopo® (IGN)	Donnée géoréférencée <i>simu_X_Reseau.csv</i>	saisie manuelle
2	Définition du système TAD (dépôts, arrêts)	ArcGIS®	Choix opérateur	Donnée géoréférencée <i>simu_X_Arrêts.csv</i> <i>simu_X_Depôts.csv</i>	saisie manuelle
3	Calcul de la Matrice OD (temps)	Network Analyst® ArcGIS®	Réseau Arrêts + dépôts	Matrice OD (temps) <i>simu_X_MatriceOD.csv</i>	quelques minutes
4	Définition de la demande usagers	Programme LispStat	Probabilités spatiales et temporelles (.csv)	Table des demandes <i>simu_X_Demande.csv</i>	quelques minutes
5	Préparation de l'optimisation du TAD	Passerelle CL #1	Tableaux ci-dessus	Fichier d'instances <i>simu_X.inst</i>	1 sec
6	Optimisation des tournées du TAD	Noyau d'optimisation GaleopSys®	Fichier d'instances	Fichier solutions <i>simu_X.sol</i>	15 min (pour 500 demandes)
7	Passerelle vers ArcGIS	Passerelle CL #2	Fichier solutions	Table individualisant chaque étape de chaque tournée <i>simu_X_T_N.csv</i>	1 sec
8	Dessin des tournées et mise en forme du détail des tournées	Network Analyst® ArcGIS® ACCESS®	<i>simu_X_T_N.csv</i>	Détail des tronçons empruntés. « Feuille-de-route » <i>simu_X_T_N_FdR.csv</i>	échelle de l'heure
9	Calcul des quantités de polluants et GES émises sur chaque tronçon	GREEN-DRT	<i>simu_X_T_N_FdR.csv</i>	Statistiques globales sur le scénario (pollution et service TAD) Quantité de polluants par tronçon <i>simu_X_émissions.csv</i>	quelques minutes
10	Cartographie des émissions de polluants émis sur le réseau routier.	ArcGIS® ACCESS®	<i>simu_X_émissions.csv</i>	Cartographie des quantités de polluants émises sur chaque tronçon du réseau routier.	quelques minutes

Le modèle GREEN-DRT présenté ici permet de calculer et de cartographier les émissions produites par des véhicules en circulation sur un réseau à l'échelle du tronçon de route. Il est adapté à l'évaluation des émissions produites par un système de TAD et rend possible l'analyse précise des impacts de leurs différentes composantes sur leurs performances environnementales.

Partie III.

**Les émissions de polluants induites par les
TAD : des effets de seuil**

Introduction

Dans les analyses précédentes, nous avons identifié différentes composantes influant sur les émissions de polluant produites par un système de TAD. En intégrant les caractéristiques des TAD, la demande de déplacements et le territoire au travers du réseau routier dans l'analyse, nous cherchons à préciser l'évaluation de la dimension environnementale des transports. Avec l'utilisation de GREEN-DRT, nous pouvons identifier les poids des différentes composantes dans les émissions de polluants individuellement et d'analyser leurs poids relatifs dans le fonctionnement des TAD.

Dans l'analyse des émissions de polluants liées au fonctionnement d'un système de TAD il est nécessaire de distinguer deux situations :

- le TAD mis en place a un rôle principalement social, en permettant par exemple de désenclaver des populations qui n'ont pas la capacité de se déplacer sur un territoire pauvre en transports en commun. Il s'agit dans ce cas de minimiser les impacts environnementaux globaux du nouveau service ;
- le TAD s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la qualité de l'air sur un territoire avec la modernisation de l'offre de transports publics. Il s'agit de favoriser le report modal du véhicule personnel vers un système de transport flexible, type TAD. Les TAD doit dans ce cas là permettre effectivement une réduction des émissions de polluants sur le territoire en question, tout en proposant une qualité de service suffisante pour être attractif.

Dans un premier temps, nous exposons les paramètres des simulations dont les résultats sont exploités dans un deuxième temps. Elles sont pensées de manière à pouvoir répondre aux questionnements relatifs, d'une part, à la prédisposition intrinsèque des réseaux à engendrer des parcours plus longs et, d'autre part, aux caractéristiques des TAD et autres composantes permettant d'en réduire les impacts sur l'environnement.

Chapitre 8 Des simulations réalisées à des échelles variées

Les émissions dépendent de divers paramètres. Pour évaluer l'impact de chacun, nous effectuons des simulations les regroupant tous, en les fixant tous, sauf un que nous faisons varier.

1. Les paramètres des simulations

Les différentes simulations effectuées pour ce travail suivent des règles identiques :

- tous les véhicules roulent à la vitesse maximale autorisée sur les tronçons de route ;
- les véhicules utilisés sont neufs, certifiés Euro 4. Il n'y a donc pas d'influence de l'usure des différentes pièces du moteur sur les émissions de polluants ;
- les flottes de véhicules sont homogènes en type et en carburant, dans l'objectif de faciliter l'analyse des résultats et leur comparaison.

Les estimations obtenues à l'issue des simulations donnent ainsi une approximation *a minima*.

On considère que les trajets effectués avec les véhicules personnels (VP) suivent le chemin optimal en temps, qui correspond au chemin le plus rapide, pour aller d'un point A à un point B. On compare alors systématiquement les trajets effectués par le service de TAD simulé (optimisé en temps) à ceux qui auraient été suivis par des VP. Ces derniers servent donc de référence pour évaluer la performance des services de TAD.

Il est plus probable qu'une demande de déplacement concerne une seule personne que deux ou trois. Cela correspond au regroupement de voyageurs observé dans les véhicules personnels. Les demandes sont donc générées selon ces probabilités, présentées dans le Tableau 11. Le cas de figure où une demande concerne le déplacement de trois personnes peut représenter la situation d'un déplacement familial.

Tableau 11. Probabilité de regroupement des demandes de déplacement

Nombre de demandes simultanées	Probabilité (%)
1	0.6
2	0.3
3	0.1

2. Présentation des cas d'étude

Nous faisons des simulations de déplacements sur différents réseaux que nous décrivons ici. Les réseaux routiers utilisés ne sont que des extraits de réseaux plus globaux. Les extraits choisis tendent à conserver les structures de desserte locale.

Nous nous basons sur des exemples bien distincts, qui nous semblent être des archétypes de réseaux, pour tenter d'identifier les caractéristiques des réseaux qui influent tant sur les quantités d'émissions de polluants produites par la circulation automobile que sur les performances fonctionnelles des TAD. Chaque réseau a été choisi dans le but de répondre à un questionnement.

Nous utilisons donc huit réseaux routiers différents sur lesquels nous appliquons divers scénarios de vitesses, de demandes et de stratégies de déploiement des TAD pour tester les influences de ces différents paramètres.

A. Les sources des données sur les réseaux routiers

Un premier ensemble de données géographiques qui concerne les réseaux routiers situés en France provient de la BD Topo de l'IGN. Celle-ci comporte la totalité des tronçons de route avec une information sur la hiérarchie des infrastructures et la nature des routes. Ces données ne comportant aucune information spécifique sur les vitesses pratiquées sur les tronçons de route et n'ayant pas les moyens matériels de les calibrer, nous les calibrons selon la nature (importance) des voies selon la grille présentée ci-dessous (Tableau 12).

Les réseaux traités se trouvant en majorité en zone urbaine ou périurbaine, la majorité des voies sont à 50 km/h. On trouve également des voies à 110, 90 et 70 km/h. Des spécificités locales existent, notamment les voies rapides de la région Bretagne n'ont pas le statut d'autoroute et sont limitées à 110 km/h alors qu'elles sont limitées à 130 km/h sur le reste du territoire français. N'ayant pas les moyens de connaître la calibration réelle (vitesse limite en chaque point), nous appliquons un calibrage des réseaux selon la grille qui suit (Tableau 12) et la considérons comme référence « observée ».

Tableau 12. Importance des routes et vitesses appliquées sur les réseaux français

Importance (BDTopo)	Vitesse (km/h)
1	110
2	90
3 ; 4	70
5	50
NC	25 (30 sur les réseaux bretons)

Les routes non-renseignées (NC) sont des voies de desserte locale, au sein de lotissements par exemple.

Pour le réseau d'Avignon, comme nous possédons des informations plus précises sur les vitesses maximales de circulation, nous considérons des voies avec les mêmes vitesses que celles présentées dans le Tableau 12 excepté pour certaines vitesses intra-urbaines fixées à 35 km/h.

En complément des réseaux français étudiés, nous traitons le réseau de Dallas qui provient du bureau de recensement américain (US Census Bureau) De la même manière, les informations sur les tronçons de route renseignent sur leur nature mais pas sur les vitesses effectivement autorisées. Pour cause, cette classification est nationale mais la législation en matière de vitesses de circulation est décidée à l'échelle des comtés. Ainsi, à Dallas, les vitesses autorisées se répartissent de 32 à 113 km/h (de 20 à 70 mph) (Tableau 13).

Tableau 13. Vitesses appliquées sur le réseau de Dallas (source : US Census Bureau)

Type de route	Vitesse (mph)	Vitesse (km/h)
Primary U.S. & State highway	70	113
Primary interstate, secondary State and county highways	60	97
Access ramp	50	80
Local, neighborhood & city street	25	40
Road, Parking Area, Roundabout	20	32

Le sujet ici n'étant pas le calcul de matrices origine/destination très précises, le calibrage des réseaux peut rester grossier, sachant par ailleurs que c'est principalement le calibrage des voies les plus importantes qui influence les temps de parcours. Les voies secondaires assurent l'acheminement vers

ce réseau principal. Par ailleurs, au niveau topologique, tous les réseaux routiers sont construits de manière à ce que chaque tronçon se situe entre deux intersections.

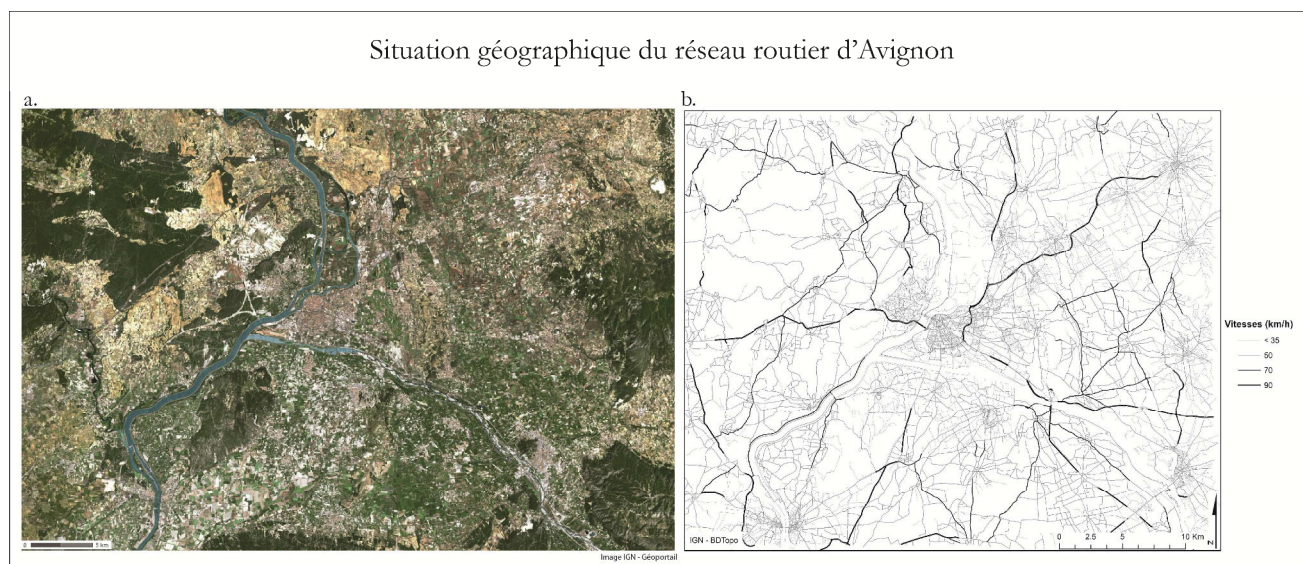
Le choix des réseaux routiers étudiés s'est fait par rapport à des caractéristiques structurelles fortes (Rennes, Grenoble, Nice, Bretagne) et ainsi avoir des archétypes, ou de disponibilité des données géographiques (Dallas et Avignon).

B. Avignon, un réseau contraint

Ce réseau routier recouvre l'agglomération d'Avignon. Il s'étend sur un rayon de 20 km autour du centre-ville. Le périmètre regroupe près de 450 000 habitants. La situation géographique d'Avignon est contrainte par la présence de deux cours d'eau majeurs (le Rhône et la Durance) qui entourent le sud-ouest de la ville (Figure 33.a). Il n'existe que 5 ponts permettant de passer d'une rive à l'autre, ce qui contraint fortement les flux et les concentrent sur ces axes.

Le réseau routier considéré est de plus de 5 000 km (Figure 33.b), avec une longueur moyenne des tronçons de route de 187 m. Le réseau est composé de 27 700 arcs. La vitesse moyenne de circulation sur les tronçons de ce réseau est de 43 km/h.

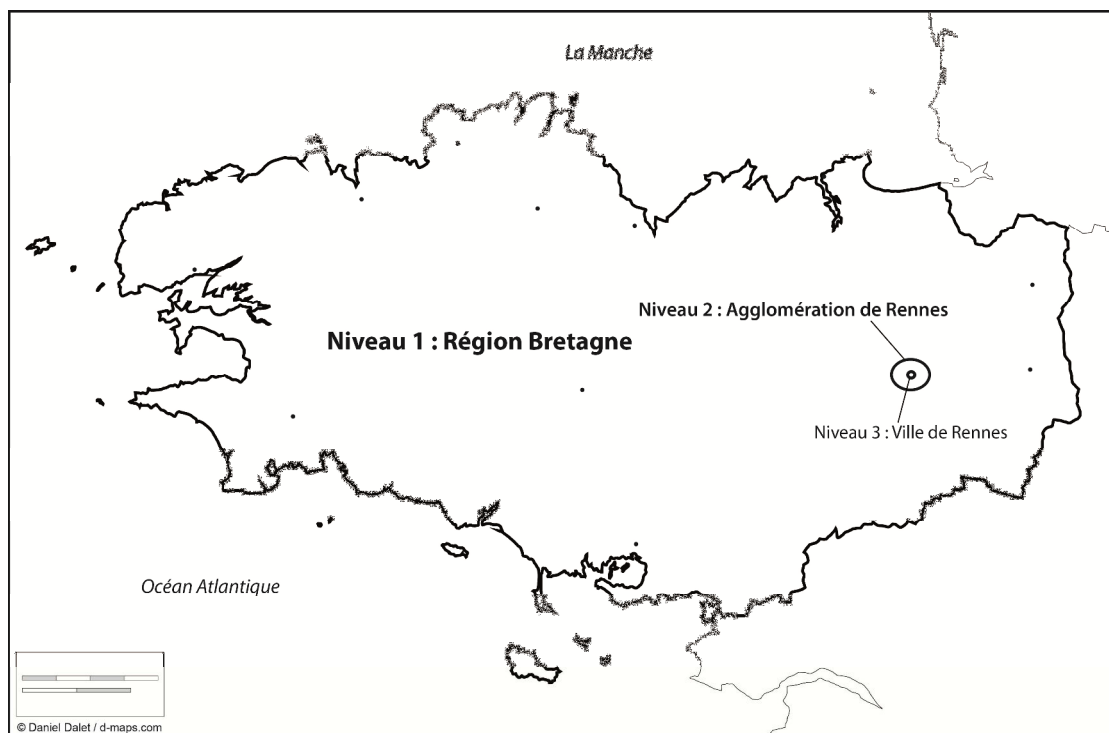
Figure 33. Situation géographique du réseau routier d'Avignon



C. La région Bretagne, des réseaux à différentes échelles

Sur le territoire de la région Bretagne, nous sélectionnons trois réseaux, à trois échelles différentes (Figure 34) : la région Bretagne ; l'agglomération de Rennes ; la ville de Rennes.

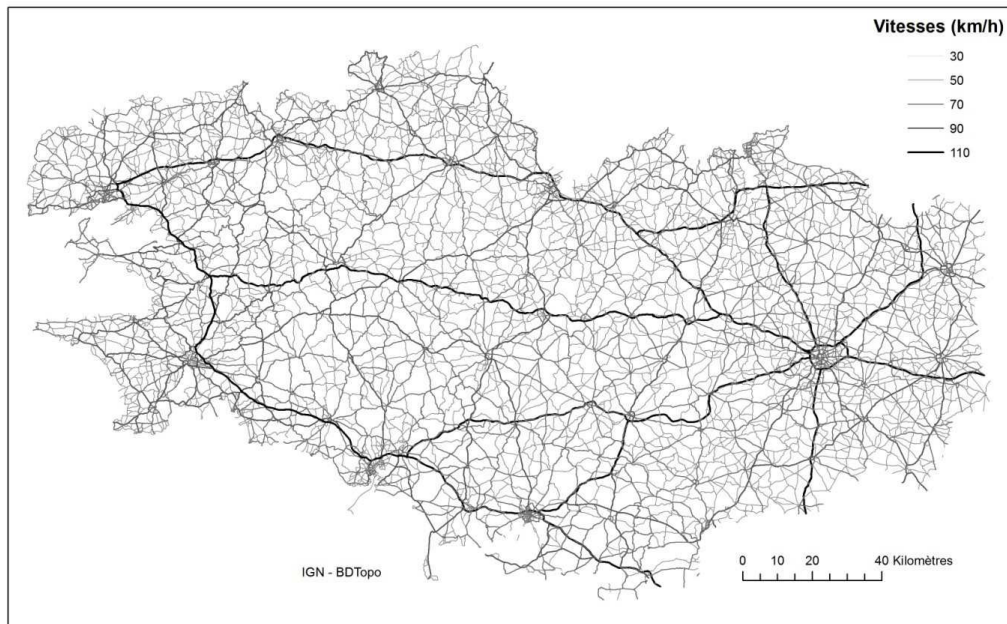
Figure 34. Niveaux d'analyse sur le territoire de Bretagne



À l'intérieur des terres, le territoire breton ne contient aucun obstacle topographique majeur.

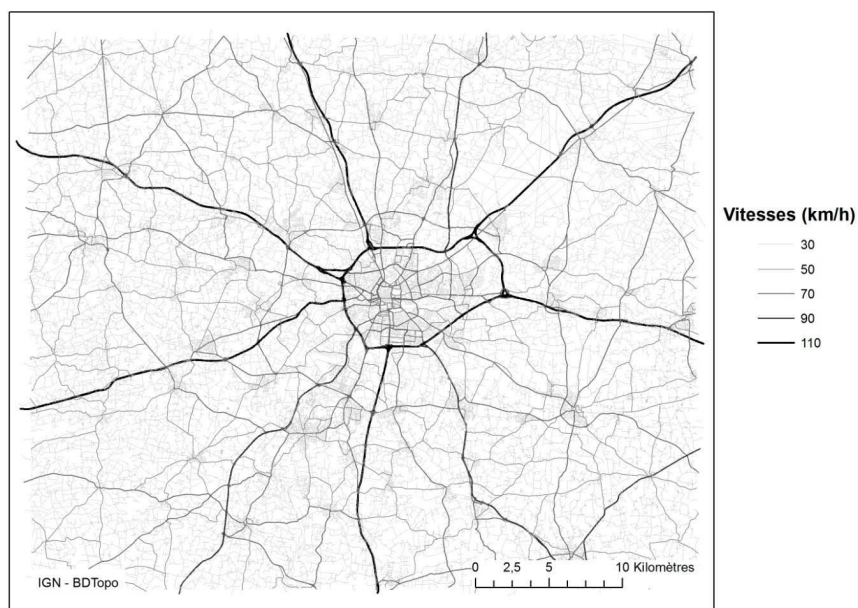
a. La région Bretagne - niveau 1

Ce territoire se situe sur un bras de terre dans l'océan. La région Bretagne est donc entourée par l'océan Atlantique au sud et à l'ouest et par la Manche au nord (Figure 34). À l'Est, le réseau est relié au réseau national. Cela induit un réseau routier principal circulaire, qui longe le littoral avec quelques routes qui traversent le territoire du nord au sud (Figure 35). Le réseau routier est composé de 239 400 tronçons de 139 m en moyenne, d'une longueur totale de 333 000 km. La vitesse moyenne sur les tronçons de route est de 55 km/h.

Figure 35. Réseau routier de la région Bretagne (*niveau 1*)

b. L'agglomération de Rennes - niveau 2

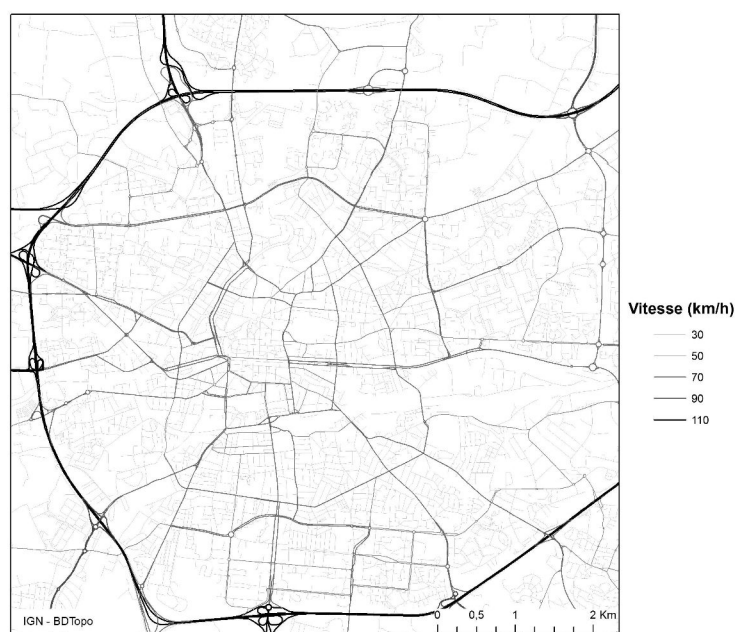
L'agglomération de Rennes est un territoire principalement périurbain. C'est un espace polarisé autour de Rennes avec des zones urbaines qui forment des pôles secondaires. Le réseau routier a une forme radiale assez classique, centrée sur la ville de Rennes (Figure 36) autour de laquelle se trouve une voie périphérique, à 3,5 km du centre-ville. Le réseau routier sélectionné est composé de 93 500 tronçons de route. La longueur totale de ce réseau est de 10 400 km.

Figure 36. Réseau routier de l'agglomération de Rennes (*niveau 2*)

c. La ville de Rennes - niveau 3

Le niveau 3 choisi sur le territoire breton est un réseau uniquement urbain. Le réseau routier de la ville de Rennes est un réseau dense composé d'une voie périphérique et de quelques axes pénétrants (Figure 37). Ce réseau comporte près de 15 000 tronçons d'une longueur moyenne de 85 m. Celui-ci a une longueur totale de 1 270 km. Les arrêts sont situés le long de la voie périphérique et à l'intérieur de l'espace délimité par cette même voie.

Figure 37. Réseau routier de la ville de Rennes (niveau 3)



D. Réseaux urbains typiques

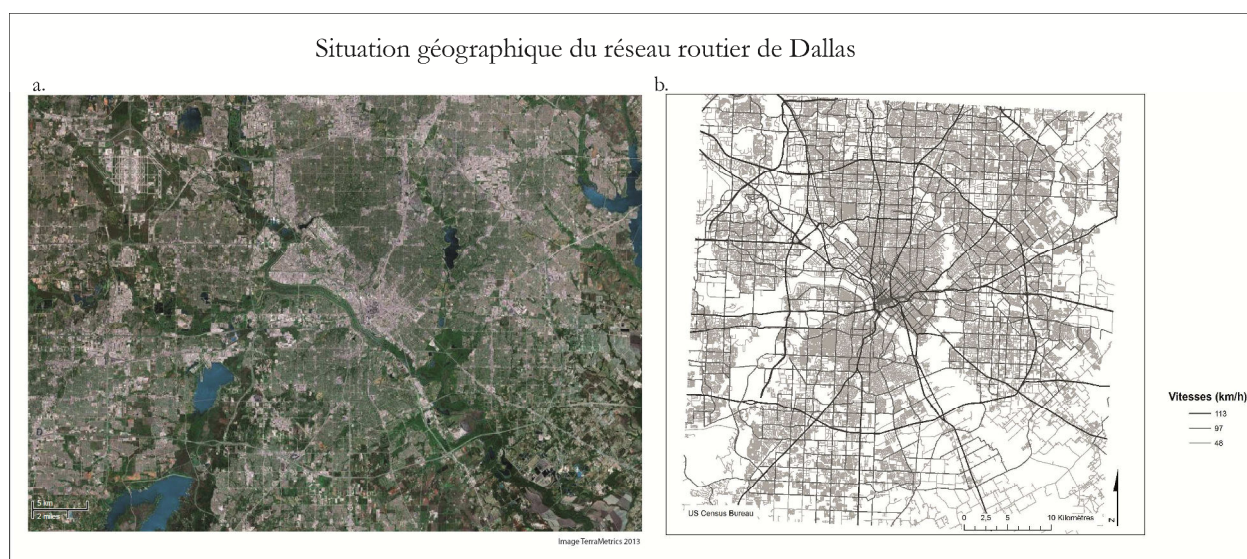
Pour tenter d'identifier des caractéristiques des réseaux qui auraient tendance à influencer les émissions de polluants par les véhicules qui circulent dessus, nous sélectionnons quatre réseaux visuellement caractéristiques, de formes typiques : orthogonal, radial, linéaire de vallée, linéaire de littoral.

a. Dallas, un réseau orthogonal

La ville de Dallas se situe au nord-est de l'état du Texas, aux États-Unis d'Amérique, au cœur des Grandes Plaines. La situation de plaine dans laquelle la ville s'inscrit permet un développement horizontal de l'aire urbaine sans réelles contraintes (Figure 38.a). Le réseau routier sélectionné est uniquement urbain. Il a la forme caractéristique des réseaux nord-américains en damier. À cette

structure s'ajoute un réseau radial (Figure 38.b). On a donc deux structures différentes superposées qui se complètent. D'une part, le réseau secondaire qui assure la desserte locale et d'autre part, le réseau primaire qui permet la traversée de l'aire urbaine. Le réseau routier est ainsi très régulier. Le réseau a une longueur totale de 18 500 km. Il est composé de 180 477 tronçons d'une longueur moyenne de 103 m. La vitesse moyenne sur la totalité des tronçons de route de ce réseau est de 62 km/h.

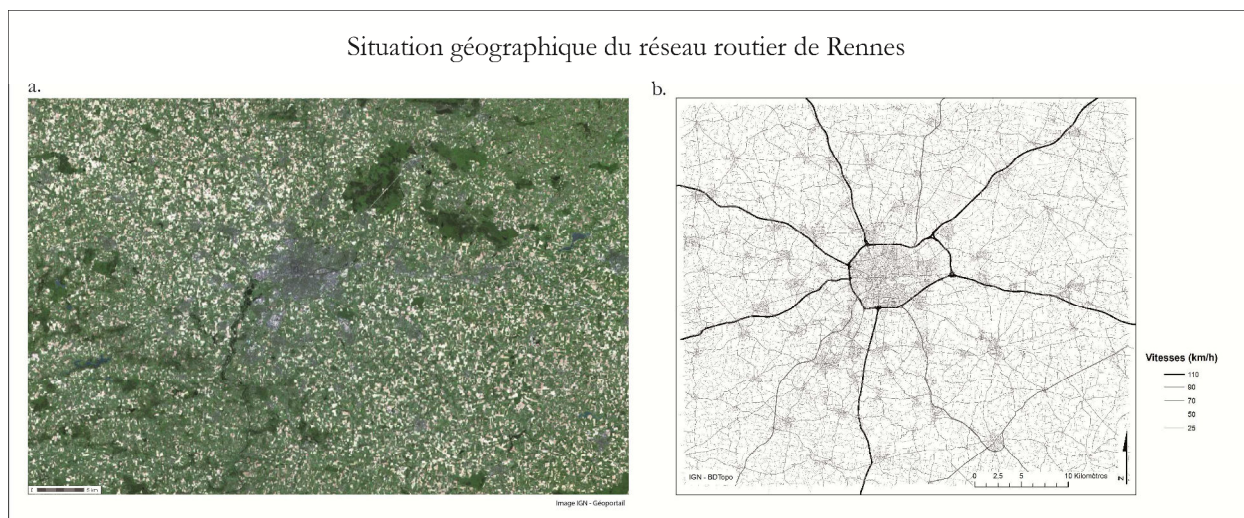
Figure 38. Situation géographique du réseau routier de Dallas



b. Rennes, un réseau radial

Dans le cadre de l'analyse de réseau typique, nous analysons le cas de Rennes. Nous choisissons un extrait de réseau différent de celui utilisé dans l'analyse multiscalaire du territoire de Bretagne. Il s'étend à 25 km autour de la ville de Rennes (Figure 39.a). Il s'approche du territoire de l'agglomération de Rennes. Il recouvre donc un espace périurbain caractérisé par la présence d'un pôle principal et de divers pôles secondaires (Figure 39.b). Le réseau routier est réparti de manière homogène sur le territoire et possède une longueur totale de 12 426 km et est composé de 114 784 tronçons. La vitesse moyenne de circulation sur ces tronçons est de 52 km/h.

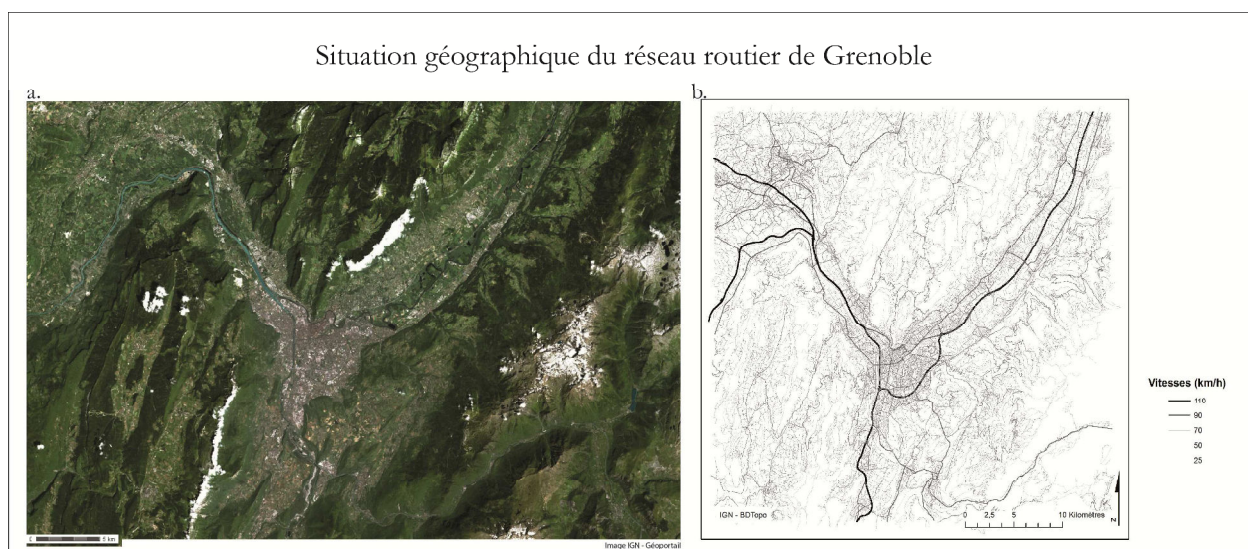
Figure 39. Situation géographique du réseau routier de Rennes



c. Grenoble, un réseau linéaire de vallée

La situation géographique de Grenoble est particulière, fortement contrainte par des obstacles topographiques. En effet, la ville se trouve au carrefour de trois vallées (Figure 40.a), à la périphérie du massif des Alpes. Le territoire est donc sur contraint par trois reliefs majeurs. Le réseau routier principal suit les vallées (Figure 40.b). Les routes périphériques se trouvent en territoire de montagne. Nombre d'entre elles ont ainsi un tracé très sinueux, forme caractéristique des routes de montagne. Le réseau routier sélectionné à une longueur totale de 10 912 km. La longueur moyenne des tronçons de route est de 143 m, avec un écart type de 207 m et une vitesse moyenne de 52 km/h.

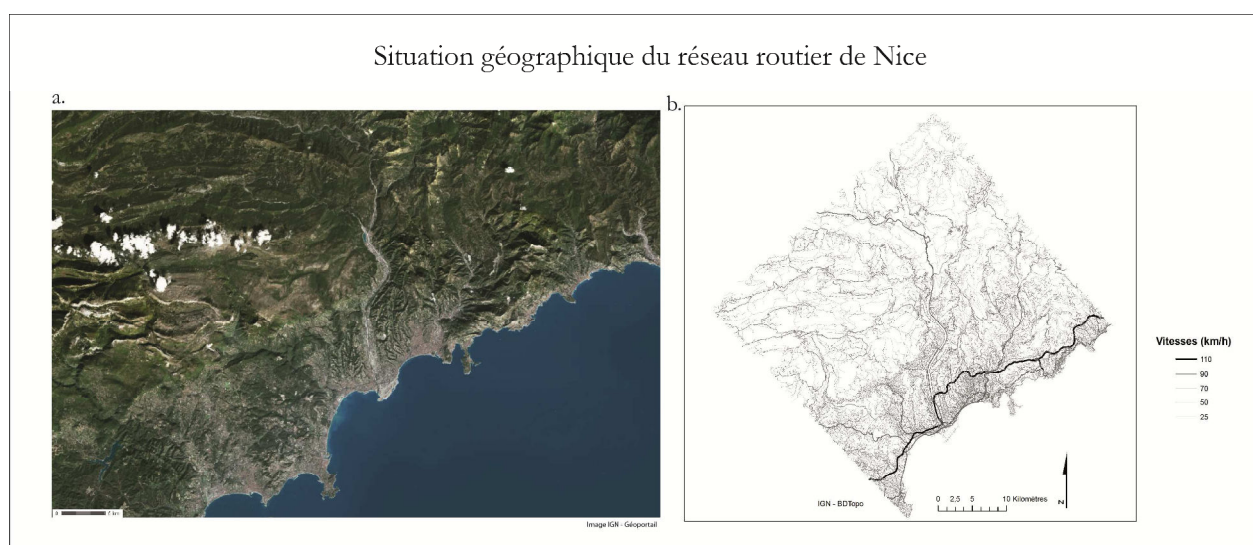
Figure 40. Situation géographique du réseau routier de Grenoble



d. Nice, un réseau linéaire de littoral

Le réseau routier de Nice a lui aussi une situation géographique particulière. En effet, la ville de Nice se situant sur le littoral méditerranéen avec un arrière-pays fortement vallonné (Figure 41.a), le réseau routier a une forme très particulière. On observe un réseau dense sur le littoral et un réseau à la densité très variable dans l'arrière-pays (Figure 41.b). Le réseau de Nice a une longueur totale de 10 566 km. La longueur moyenne des routes est de 146 m avec un écart type de 230 m. La vitesse moyenne sur les tronçons de route est de 51 km/h.

Figure 41. Situation géographique du réseau routier de Nice



E. Synthèse descriptive des réseaux

Le tableau qui suit (Tableau 14) présente une synthèse des caractéristiques de chacun des réseaux routiers présentés ci-dessus et utilisés par la suite.

Le scénario de vitesse « constant » correspond à l'application d'une vitesse unique (60 km/h) sur tous les tronçons de route. Il n'est appliqué que dans le cas des réseaux « typiques ».

Tableau 14. Caractéristiques des réseaux routiers analysés

		Scénario vitesse	Surface rectangle englobant (km²)	Nombre de tronçons	Nombre de sommets	Longueur totale réseau (km)	Longueur des tronçons de route (m)		Vitesse sur les tronçons de route (km/h)	
							Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type
Typiques	Dallas	Constant	2 440	180 477	134 714	18 510	103	106	60	0
		Réel							62	24.5
	Nice	Constant	1 707	72 545	59 889	10 566	146	230	60	0
		Réel							51	16.53
	Grenoble	Constant	1 675	76 553	60 755	10 912	143	207	60	0
		Réel							52	15.34
	Rennes	Constant	1 910	114 784	91 205	12 426	108	140	60	0
		Réel							52	12.76
Avignon		Réel	1 450	27 707	21 334	5 173 969	187	288	42.74	11.70
		Lent							40.40	9.25
		Rapide							53	13.30
		Homogène							51.94	10.00
Bretagne	Niveau 1	Réel	31 225	239 399	184 815	333 024	139	194	54.73	22.83
	Niveau 2	Réel	1 625	93 504	77 736	10 411	111	142	36.84	14.73
	Niveau 3	Réel	105	14 956	12 026	1 271	85	117	40.67	18.76

3. Une approche statistiquement validée

Une simulation est composée d'un réseau, sur lequel on peut appliquer des scénarios de vitesse, d'un scénario de demandes de déplacements et de la modélisation d'un système de TAD en réponse à ces demandes. On fixe tour à tour les paramètres pour ne tester la variation d'un seul à la fois. L'optimisation des VP passe par le calcul du plus court chemin en temps sur le réseau routier entre les points de départ et d'arrivée, calculés à l'aide d'un système d'information géographique, selon les différentes structures de réseaux testées. Comme nous l'avons vu, cela est plus complexe pour l'optimisation des TAD et la question de la représentativité d'une unique simulation se pose.

Afin de réduire la quantité de simulations permettant d'estimer les émissions produites par l'usage des TAD pour une demande donnée, très gourmandes en temps de calcul, nous étudions l'intervalle de confiance statistique d'échantillons sélectionnés. Certains paramètres sont fixés pour l'ensemble des simulations. Nous établissons ainsi quelques postulats de travail et des caractéristiques communes de simulation de manière à les rendre comparables.

Comme nous l'avons présenté, les simulations reposent sur deux éléments : la construction des demandes (aléatoire sous contraintes de probabilité) et l'optimisation des tournées de TAD (avec une approche heuristique).

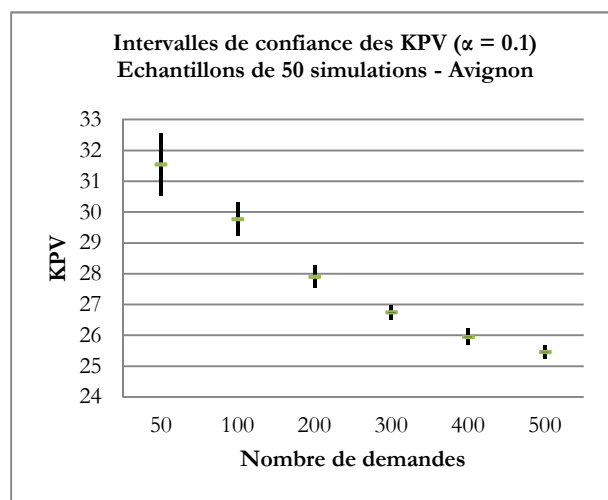
Une simulation est un échantillon des configurations possibles d'un scénario donné. L'optimisation des tournées d'un TAD avec le noyau Galeopsys produit une bonne solution, mais pas nécessairement la meilleure. La dimension la plus variable de l'approche établie réside donc dans l'optimisation des tournées de TAD selon les scénarios de demandes et notamment le nombre de demandes dans un même intervalle de temps sur un territoire donné. Ce paramètre conditionne la capacité de l'algorithme à regrouper les demandes de déplacement dans des tournées. Nous commençons donc par déterminer la variabilité statistique des échantillons de configuration en nous basant sur une mesure globale du regroupement des voyageurs au sein des tournées, le KPV (kilomètres par voyageur) et ainsi identifier la probabilité qu'un seul tirage d'un scénario donné soit représentatif du scénario.

Pour tester statistiquement cette variabilité, nous optimisons dans un premier temps des échantillons de 50 instances d'un même scénario de demande de déplacements selon différents effectifs : 50 ; 100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 demandes. On se base sur le réseau d'Avignon sur lequel on a localisé 67 arrêts de manière aléatoire, dans le cadre d'un scénario de demandes de TAD spatialement aléatoire, répartis au cours de la journée selon le scénario-type semaine (voir « Des configurations temporelles » p. 114). Nous appliquons une fenêtre de temps fixe de 15 minutes pour chaque demande de déplacement.

Après l'optimisation des tournées, on calcule les intervalles de confiance du KPV (kilomètres par voyageur ; $\frac{km_{tot.simu}}{Nb_{voyageurs}}$) de chaque échantillon. Il en ressort une discrétisation franche des

intervalles de confiance selon les effectifs de demandes (Graphique 1), sans aucun recouvrement.

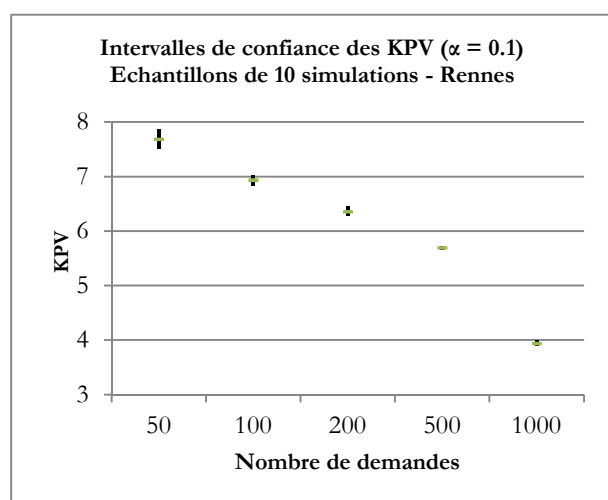
Graphique 1. Intervalles de confiance ($\alpha = 0.1$) des KPV selon les effectifs de demande – réseau d'Avignon



Effectif	Moyenne KPV	Écart type	Borne inf.	Borne sup.
50	31,55	2,38	30,54	32,56
100	29,78	1,29	29,23	30,33
200	27,91	0,84	27,56	28,26
300	26,75	0,56	26,51	26,99
400	25,95	0,62	25,69	26,21
500	25,47	0,51	25,25	25,68

Pour confirmer ce constat, nous analysons dans un second temps le même type de scénario spatial et temporel appliqué au réseau routier de Rennes (36 arrêts et 3 dépôts). Nous optimisons des échantillons de 10 configurations de demandes pour chaque effectif de demande de 50 ; 100 ; 200 ; 500 ; 1 000 individus qui sont ceux que nous utilisons par la suite pour évaluer l'impact de la montée en charge sur les différentes performances des services de TAD (Graphique 2).

Graphique 2. Intervalles de confiance ($\alpha = 0.1$) des KPV selon les effectifs de demande – réseau de Rennes



Effectif	Moyenne KPV	Écart type	Borne inf.	Borne sup.
50	7,69	0,42	7,51	7,86
100	6,93	0,23	6,84	7,03
200	6,36	0,21	6,27	6,45
500	5,69	0,07	5,66	5,72
1000	3,94	0,11	3,89	3,98

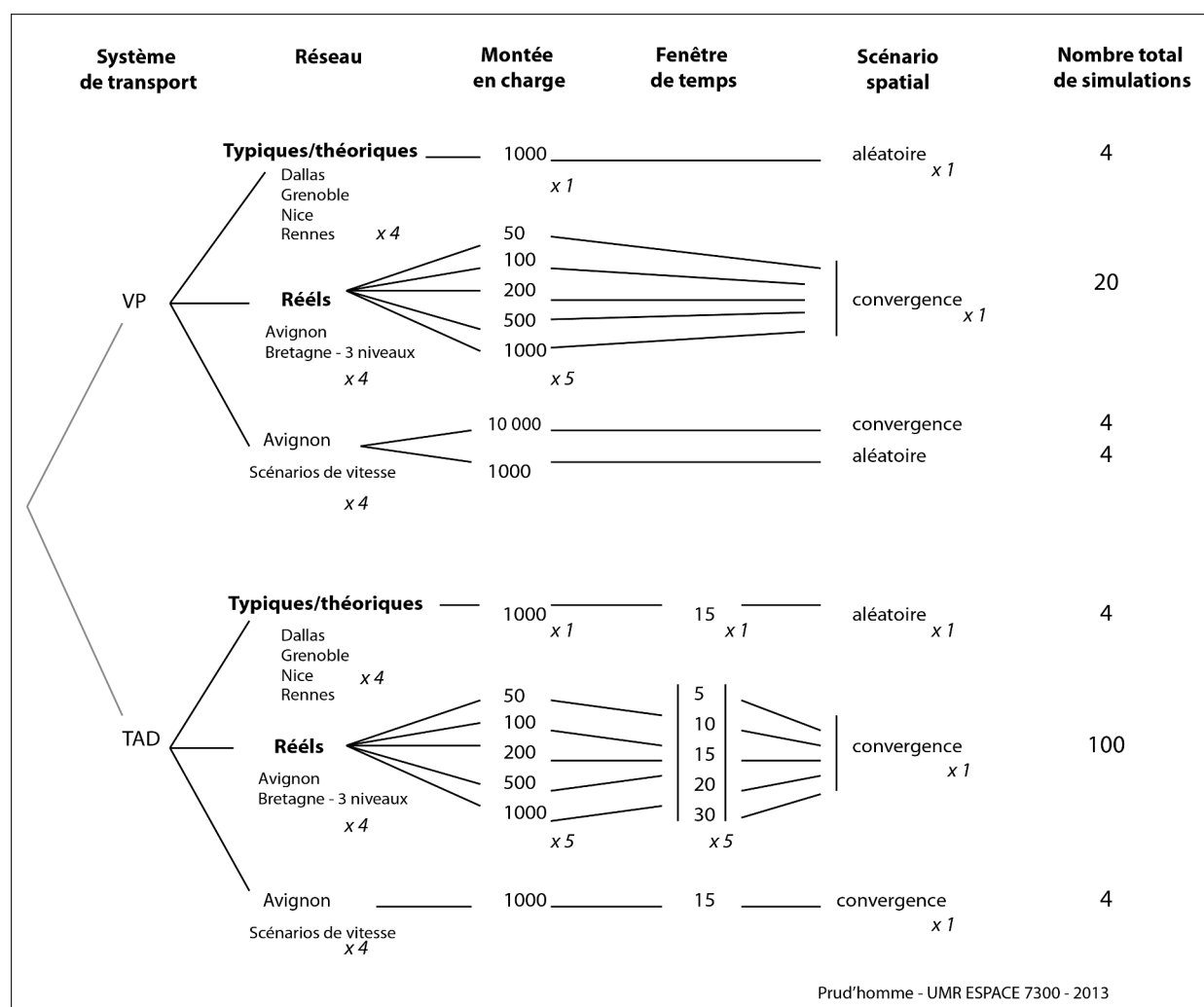
Nous obtenons les mêmes conclusions que précédemment : les intervalles de confiance sont strictement discriminés. Par ailleurs, nous obtenons, pour un même niveau de demandes, des différences significatives entre les réseaux d'Avignon et de Rennes (respectivement $KPV \approx 25$ et ≈ 6).

N'étant pas en mesure de multiplier les échantillons pour chaque scénario de simulation effectué, nous considérons qu'un seul exemplaire de chaque scénario est suffisant pour obtenir des résultats statistiquement pertinents et représentatifs du scénario.

Chapitre 9 Résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats des différentes simulations effectuées telles que présentées dans la Figure 42. Paramètres de simulations effectuées.

Figure 42. Paramètres de simulations effectuées



Nous commençons par déterminer l'impact de la forme du réseau routier sur les distances parcourues par les véhicules (VP et TAD) avant de préciser l'influence des vitesses sur les émissions de polluants selon le carburant. Nous terminons en explorant l'influence des différents paramètres des TAD sur les émissions de polluants.

4. Influence des caractéristiques morphologiques des réseaux sur les distances parcourues

Pour évaluer l'impact de la morphologie des réseaux sur les émissions de polluants, nous commençons par comparer les distances induites par 500 déplacements identiques en origine et destination sur quatre réseaux différents, que ces déplacements soient réalisés en VP ou avec un service de TAD. Dans un premier temps, ces réseaux sont évalués avec une vitesse constante de 60 km/h. En valuant ensuite les routes avec les vitesses maximales autorisées, nous voulons évaluer l'impact de la hiérarchisation des routes sur les distances parcourues par les véhicules selon les réseaux. Forts de ces enseignements, nous évaluons l'impact de la morphologie du réseau sur les capacités de regroupement d'un service de TAD. De la même manière, nous évaluons l'impact de la hiérarchisation des routes sur ses différentes performances.

Pour cela, nous choisissons quatre réseaux routiers qui sont visuellement particuliers : Dallas, Rennes, Grenoble, Nice. Chacun a des caractéristiques particulières qui ont été décrites dans le Tableau 14 (réseaux typiques).

Le réseau de Dallas sélectionné est celui qui recouvre la plus grande surface (2 440 km²) avec une longueur totale de 18 510 km et qui est composé du plus grand nombre de tronçons (180 477), avec une longueur moyenne des tronçons de 103 mètres. Le réseau de Rennes recouvre quant à lui 1 910 km². D'une distance totale de 12 426 km, il est composé de 114 784 tronçons d'une longueur moyenne de 108 mètres. Les réseaux de Grenoble et Nice considérés ont des caractéristiques très proches. Respectivement, ils couvrent 1675 et 1707 km² et ont une longueur totale de 10 912 et 10 566 km. Les tronçons de route ont une longueur moyenne de 143 et 146 m, avec des écart-types semblables : 207 et 230 m.

Bien que les couvertures des réseaux aient été choisies arbitrairement et de la même manière la longueur totale des réseaux et le nombre de tronçons, la longueur moyenne des tronçons peut être considérée comme représentative des réseaux. En les comparant, on retrouve certaines observations faites sur les réseaux au préalable, avec notamment, d'une part, les réseaux qui sont localisés en plaine (Dallas et Rennes) dont la longueur moyenne des tronçons est réduite (respectivement 103 et 108 mètres), avec des écart-type modérés (de 1 à 1,3 fois plus important que la moyenne avec 106 et 140 mètres) ; et, d'autre part, ceux qui ont été développés sur des territoires accidentés, avec des obstacles topographiques forts (Grenoble et Nice) pour lesquels on observe une longueur moyenne des tronçons similaires avec un écart-type égal à 1,45 à 1,54 fois celle-ci. Les tronçons de route sont

globalement plus longs dans le deuxième cas. Il y a donc moins d'intersections, ce qui induit des distances à parcourir potentiellement plus longues.

On applique sur chacun des réseaux le même semis aléatoire de 100 arrêts et de 5 dépôts pour les TAD et de 100 arrêts pour les VP, sans dépôts. Seul dans le cas de Nice, le semis a été pivoté pour respecter l'orientation du territoire imposée par la situation littorale. Les distances à vol d'oiseau entre les arrêts sont donc identiques.

On crée 500 demandes de déplacement, sans contraintes spatiale ou temporelle. Un déplacement est possible entre tous les arrêts à n'importe quel moment de la journée. Nous pouvons ainsi comparer les distances parcourues sur chaque réseau pour répondre à un même scénario de déplacement. Nous utilisons le calcul du taux de croissance (Δ) pour évaluer l'impact de la hiérarchisation des réseaux avec la vitesse sur les distances parcourues, ou encore l'augmentation des distances parcourues selon qu'on utilise les VP ou un service de TAD.

Nous appliquons donc la formule suivante :

$$\Delta = \frac{Va - Vd}{Vd} \times 100$$

avec

Vd : valeur considérée de référence ;

Va : valeur observée résultante.

A. Effet de la morphologie des réseaux sur les distances parcourues.

Nous commençons par analyser les distances parcourues sur les réseaux routiers avec une vitesse de circulation constante de manière à n'analyser que les effets de leurs caractéristiques morphologiques.

Comme nous pouvons le constater dans le Tableau 15, les caractéristiques du réseau de Dallas permettent de minimiser les distances parcourues. En effet, pour répondre à une demande de déplacement en origine et destination en VP, optimisée en temps, on parcourt moins de kilomètres sur le réseau de Dallas (11 922 km). Cela reste tout de même comparable à la distance parcourue sur le réseau de Rennes (12 563 km). En revanche, comme pressenti avec la comparaison des longueurs moyennes des tronçons, les réseaux de Grenoble et de Nice engendrent des kilométrages plus importants, respectivement 16 310 et 16 645 km.

En répondant à la demande de déplacement avec un système de TAD, on observe une augmentation générale des distances globales parcourues par rapport aux distances parcourues en VP (Tableau 16). On retrouve encore la différenciation des réseaux de Dallas et Rennes avec ceux de Grenoble et Nice. On observe une augmentation des distances globales plus importante pour ces deux derniers. Cette augmentation va de 49 % sur le réseau de Dallas à 62 % sur celui de Nice, soit respectivement 5 920 et 10 309 km supplémentaires. Sur le réseau de Grenoble, l'usage de TAD provoque une augmentation de 61,5 % de la distance, soit 10 032 km alors qu'à Rennes elle est de 54% (6 749 km).

Tableau 15. Distances parcourues selon les réseaux routiers

	Réseau	Distance (km)
VP	Dallas	11 922
	Rennes	12 563
	Grenoble	16 310
	Nice	16 641
TAD	Dallas	17 842
	Rennes	19 312
	Grenoble	26 342
	Nice	26 950

Tableau 16. Augmentation des distances des TAD par rapport aux VP

	Réseau	Augmentation (%)	Valeur absolue (km)
VP Vs TAD (vitesse constante)	Dallas	49,66	5 920
	Rennes	53,72	6 749
	Grenoble	61,51	10 032
	Nice	61,95	10 309

La mise en correspondance de ces distances globales et des indices descriptifs révèle un ordre identique des réseaux. En effet, que ce soit par rapport à l'indice de détours moyens (du plus important au plus faible) ou de l'efficacité moyenne des plus courts chemins en temps moyens (du plus important au plus faible), on retrouve dans l'ordre croissant Dallas ; Rennes ; Grenoble ; Nice (Tableau 17).

Tableau 17. Indicateurs de description des réseaux

Réseaux	Distance totale réseau (km)	Indice de détour moyen	Efficacité moyenne des pcc en temps (km/h)	Longueur moyenne des tronçons (m)
Dallas	18 510	0,841	50,48	103
Rennes	12 426	0,827	49,64	108
Grenoble	10 912	0,658	39,45	143
Nice	10 566	0,624	37,44	146

La longueur moyenne des tronçons conditionne la possibilité d'effectuer des détours. Plus les tronçons sont grands, moins il y a d'alternatives de chemin pour un même trajet sur le réseau. Ainsi, les distances globales parcourues pour répondre à une demande de déplacement sont plus importantes lorsque la longueur moyenne des tronçons est grande. Adjointe aux valeurs de l'indice de détour moyen et d'efficacité des trajets optimaux en temps, cette information permet d'identifier quantitativement deux types de réseaux : les réseaux établis en plaine, sans contrainte topographique forte et ceux développés sur des terrains un peu plus accidentés (montagne notamment).

B. Effets de la hiérarchisation des réseaux par la vitesse sur les distances parcourues

On étudie désormais l'impact de la hiérarchisation des routes par les vitesses maximales autorisées sur ces mêmes réseaux. On emploie les valeurs de vitesses maximales indiquées dans la partie « Présentation des cas d'étude » p. 164.

La hiérarchisation des routes par la vitesse provoque une augmentation générale des distances parcourues (Tableau 18). Les plus courts chemins en temps se détournent du plus court chemin en temps pour rejoindre les voies les plus rapides, avec toutefois des différences entre le degré de hiérarchie et le nombre de voies rapides. On observe ainsi une augmentation des détours des trajets par rapport à la géographie euclidienne (soit une diminution de l'indice de détour) et de la sorte des distances parcourues. Avec nos scénarios, on constate une augmentation des distances de près de 5 % sur le réseau de Dallas contre près de 17 % sur le réseau de Nice, soit respectivement 588 et 2 811 km.

Tableau 18. Comparaison distances en VP entre réseau à vitesse constante et réseau hiérarchisé

Réseau		Distance (km)	Augmentation (%)	Valeur absolue (km)
Dallas	Constant	12 510	4,9	588
	Hiérarchisé	17 842		
Rennes	Constant	13 999	11,4	1436
	Hiérarchisé	19 312		
Grenoble	Constant	18 660	14,4	2350
	Hiérarchisé	26 342		
Nice	Constant	19 452	16,9	2811
	Hiérarchisé	26 950		

La hiérarchisation des routes par la vitesse implique également une diminution de **l'indice de détournement moyen** sur les réseaux (Tableau 19). Pour rappel, un indice de détours élevé signifie que les détours sont moins importants. Cette dégradation de l'indice de détournement est notablement plus faible sur le réseau de Dallas (-3,6 points) que sur les autres réseaux : Rennes, -6,1 ; Grenoble, -7,3 ; Nice, -8,6 points.

Dans la logique de minimisation des temps de trajets, les véhicules utilisent préférentiellement les voies les plus rapides. L'application des vitesses sur les réseaux routiers engendre donc une modification du tracé des plus courts chemins en temps et donc leur longueur. La variation de l'indice de détournement observée ici révèle une propension plus forte des réseaux français à l'augmentation des distances parcourues lorsque que l'on cherche à minimiser le temps de transport. Cela affecte l'efficacité des trajets.

En effet, dans le calcul de **l'efficacité moyenne des plus courts chemins**, on divise la distance parcourue sur le réseau par le temps de parcours à vol d'oiseau entre deux points. Une distance importante du plus court chemin en temps sur le réseau n'implique donc pas forcément une efficacité plus faible, cela dépend de la vitesse pratiquée. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'application des vitesses « réelles » améliore significativement l'efficacité moyenne des trajets de certains réseaux par rapport à la vitesse moyenne de 60 km/h (Dallas, + 28,9 km/h et dans une moindre mesure Rennes, + 12,6 km/h). Pour d'autres réseaux, comme celui de Nice, l'application des vitesses réduit l'efficacité des trajets (-3 km/h). Cela revient à dire que l'efficacité du réseau de Nice, hiérarchisé, se situe en dessous de 60 km/h, alors que celle du réseau de Dallas se trouve bien au-dessus de 60 km/h.

Il semble ainsi que l'amélioration de l'efficacité moyenne des plus courts chemins sur un réseau relève d'une balance entre les distances à parcourir et les vitesses appliquées sur le réseau propres aux caractéristiques de chacun. Une bonne efficacité peut permettre de minimiser les temps de trajet tout en régulant les distances à parcourir.

Tableau 19. Modification des indices « réseau » avec l'application des vitesses sur les réseaux

		Indice de connectivité	Indice de détour moyen	Différence détours	Efficacité moyenne des pcc en temps (km/h)	Différence efficacité (km/h)	Distance moyenne par véhicules
Dallas	Constant	0,45	84,14	-3,6	50,48	28,9	23,8
	Réel		80,53		79,40		25
Rennes	Constant	0,4195	82,73	-6,1	49,64	12,6	25,1
	Réel		76,64		62,27		28
Grenoble	Constant	0,42	65,76	-7,3	39,45	1,9	32,6
	Réel		58,43		41,34		37,3
Nice	Constant	0,4	62,40	-8,6	37,44	-3,0	33,3
	Réel		53,85		34,48		38,9

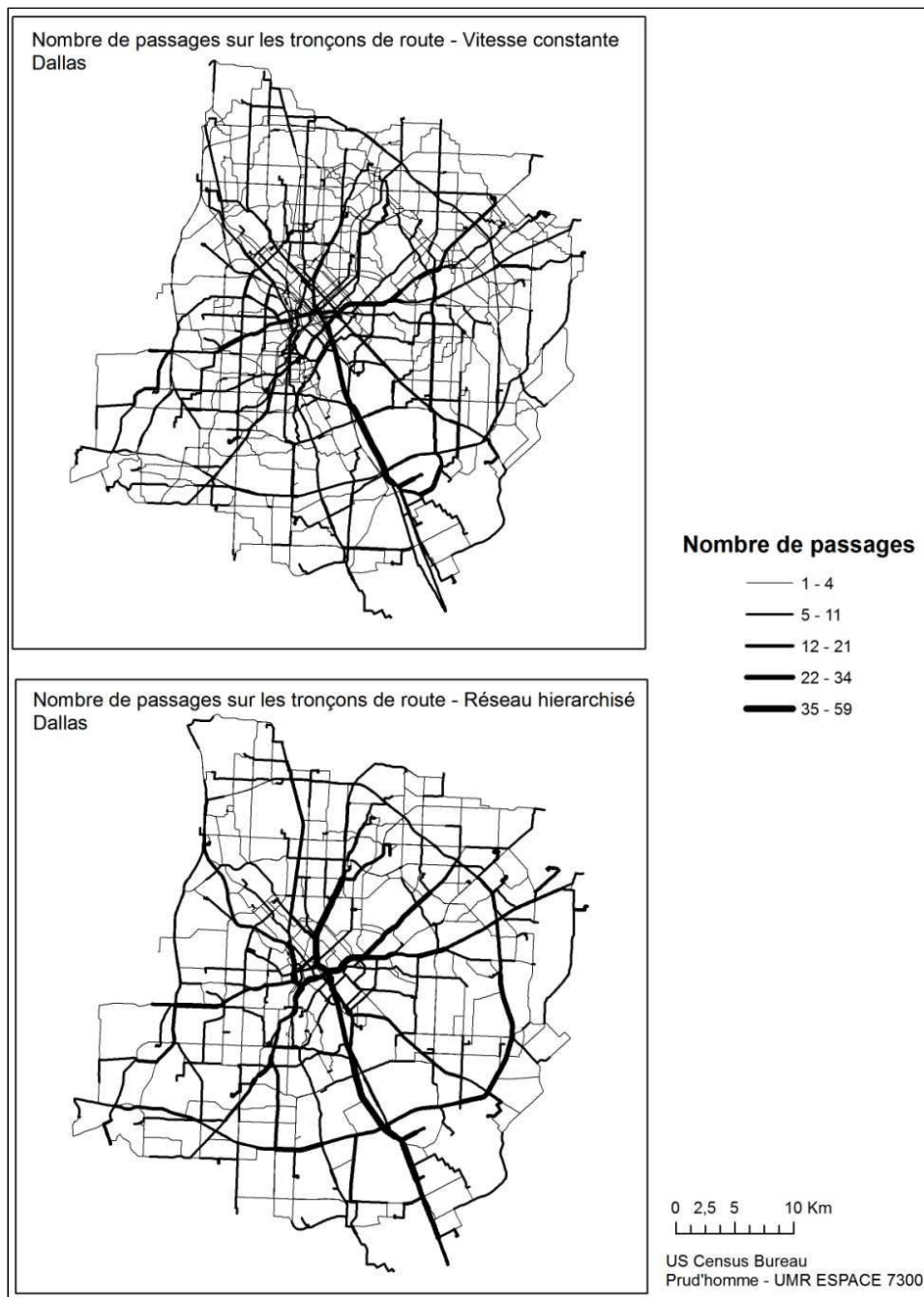
On note également la différence qui existe entre la **vitesse moyenne des tronçons** d'un réseau routier et la **vitesse moyenne de circulation** des véhicules. On observe une augmentation entre 23 km/h et 26 km/h sur les réseaux français et de 42 km/h sur le réseau de Dallas (une vitesse moyenne de 62 km/h sur l'ensemble des tronçons de route ; une vitesse moyenne de circulation de 104 km/h) (Tableau 20).

Tableau 20. Comparaison de l'indicateur de Marchand et des vitesses moyennes selon réseaux routiers

	Indicateur de Marchand (km/h)	Vitesse moyenne tronçons de route (km/h)	Vitesse moyenne de circulation (km/h)	Différence de vitesse moyenne
Dallas	97,4	62	104,10	42,10
Rennes	80,4	52	78,04	26,04
Grenoble	69	52	78,40	26,40
Nice	62,4	50,75	74,82	24,07

L'observation faite sur le réseau de Dallas peut s'expliquer par la capacité du réseau secondaire « orthogonal » à diriger les flux vers les voies du réseau primaire à grande vitesse. On constate sur les cartes suivantes (Carte 1) la concentration massive des flux avec la hiérarchisation des routes avec la vitesse.

Carte 1. Localisation des flux simulés sur le réseau de Dallas selon la hiérarchisation des tronçons de route



La hiérarchisation des voies avec la vitesse augmente la longueur des détours effectués en parcourant les plus courts chemins en temps. Cela accroît les distances totales parcourues pour un même déplacement, ce qui engendre des émissions de polluants supplémentaires. Cependant, la hiérarchisation permet d'observer une meilleure efficacité des trajets.

C. Effets de la hiérarchisation des routes sur les performances des TAD

a. Distances parcourues

La hiérarchisation des routes avec la vitesse dans le cas des TAD engendre comme pour les VP, une augmentation des distances parcourues (Tableau 21). Excepté dans le cas de Dallas, où la part d'augmentation des distances entre le réseau à vitesse constante et le réseau hiérarchisé est légèrement plus importante dans le cas des TAD que dans le cas des VP (5,74% dans le cas des TAD ; 4,93% dans le cas des VP), on note une augmentation des distances plus réduite avec les TAD dans le cas des réseaux français (jusqu'à 2 points de moins entre TAD et VP dans le cas de Nice).

Tableau 21. Comparaison distances en VP et TAD entre réseau à vitesse constante et réseau hiérarchisé

Réseau			Distance (km)	Augmentation (%)	Valeur absolue (km)
Dallas	VP	Constant	11 922	4,9	588
	VP	Hiérarchisé	12 510		
	TAD	Constant	17 842	5,7	1025
	TAD	Hiérarchisé	18 867		
Rennes	VP	Constant	12 563	11,4	1436
	VP	Hiérarchisé	13 999		
	TAD	Constant	19 312	9,8	1895
	TAD	Hiérarchisé	21 207		
Grenoble	VP	Constant	16 310	14,4	2350
	VP	Hiérarchisé	18 660		
	TAD	Constant	26 342	13	3423
	TAD	Hiérarchisé	29 765		
Nice	VP	Constant	16 641	16,9	2811
	VP	Hiérarchisé	19 452		
	TAD	Constant	26 950	15	4038
	TAD	Hiérarchisé	30 988		

Il semble donc que l'application des vitesses sur le réseau routier a un impact plus modéré sur les distances parcourues en TAD par rapport à celles effectuées en VP. Le TAD ne peut pas profiter de la hiérarchisation des routes de la même manière que les VP du fait des arrêts successifs à faire pour prendre en charge les clients.

Les vitesses moyennes de circulation sont globalement légèrement plus faibles en TAD qu'en VP quel que soit le réseau routier, conséquence des arrêts paramétrés à 2 mn des véhicules à chaque prise en charge ou dépôt de clients. En effet, dans notre modélisation, les VP ne s'arrêtent jamais entre le départ et l'arrivée.

Tableau 22. Augmentation des distances parcourues avec l'utilisation des TAD par rapport aux VP selon les réseaux à vitesse constante et les réseaux hiérarchisés

		Augmentation (%)	Valeur absolue (km)
VP vs TAD (Constant)	Dallas	49,66	5 920
	Rennes	53,72	6 749
	Grenoble	61,51	10 032
	Nice	61,95	10 309
VP vs TAD (Hiérarchisé)	Dallas	50,81	6 357
	Rennes	51,49	7 208
	Grenoble	59,51	11 105
	Nice	59,30	11 536

Le Tableau 22 montre une augmentation de 50 % à 60 % des distances parcourues avec l'usage des TAD sur les quatre réseaux par rapport à l'usage des VP. Il n'y a donc pas de réel impact de l'application des vitesses sur la différence de distance parcourue entre VP et TAD.

b. Distances à vide

On note la part importante des distances parcourues à vide (Tableau 23) (lorsque le véhicule ne transporte aucun passager), de 45,6 % (Dallas) à 48,4 % (Grenoble) de la distance totale parcourue dans le cas de vitesse constante sur le réseau et de 41,9 % (Dallas) à 50,2 % (Grenoble) dans le cas des réseaux hiérarchisés.

On observe une réduction de la part des distances à vide avec la hiérarchisation des routes avec les vitesses réelles pour Dallas (respectivement 45,6 % ; 41,9 %) et Rennes (respectivement 46,9 % ; 45,5 %). En revanche, on observe une augmentation de cette part pour Grenoble (48,4 % ; 50,2 %) et Nice (48,1 % ; 48,9 %).

Tableau 23. Distances parcourues à vide (TAD)

		Distance totale (km)	Nb tournées	Distance à vide totale (km)	Part distance à vide (%)
Constant	Dallas	17 842	76	8 143	45,64
	Rennes	19 312	78	9 066	46,94
	Grenoble	26 342	101	12 750	48,40
	Nice	26 950	101	12 955	48,07
Hiérarchisé	Dallas	18 867	56	7 910	41,93
	Rennes	21 207	70	9 654	45,52
	Grenoble	29 765	97	14 936	50,18
	Nice	30 988	107	15 155	48,91

Les distances à vide correspondent à deux situations : **la distance d'approche**, lorsque le véhicule part ou rentre au dépôt, et **la distance de fonctionnement** qui regroupe les distances parcourues à vide entre les courses.

L'analyse de la **distance d'approche moyenne** (Tableau 24) permet d'identifier une fois de plus deux groupes : les réseaux de plaine et les réseaux en territoire accidenté. Ainsi, dans le premier, on observe une distance d'approche moyenne autour de 35 km alors que pour le second, elle est supérieure à 50 km (54 km pour le réseau de Grenoble, 51 km pour le réseau de Nice). Cela représente 30 % de la distance parcourue à vide par les TAD dans le premier groupe et 40 % dans le second.

La hiérarchisation des routes provoque une diminution des **distances d'approche totales** (Tableau 24), ce qui est la conséquence de la diminution du nombre de tournées (Tableau 23). Cela va avec un meilleur regroupement des clients dans les tournées. Par contre, les **distances d'approche moyennes** augmentent. On observe une augmentation de 2 km sur le réseau de Grenoble, 5 km pour celui de Dallas, de 6 km à Rennes et de 11 km dans le cas de Nice.

L'analyse des **distances parcourues à vide** révèle leur augmentation globale avec la hiérarchisation des routes. On constate également que la part de la **distance de fonctionnement** dans la distance parcourue à vide (Tableau 24) augmente dans les cas de Dallas (68 % ; 72 %) et de Grenoble (59 % ; 63 %), est identique sur le réseau de Rennes (69,49 % ; 69,68 %) et plus faible dans le cas de Nice (60 % ; 55,5 %). Les dépôts ayant été positionnés de manière arbitraire dans le semis des arrêts, ils n'ont pas la même accessibilité selon les réseaux. Dans le cas de Nice, ils se retrouvent à proximité des axes principaux du réseau routier. Leur accessibilité est ainsi renforcée avec la hiérarchisation des voies.

Tableau 24. Répartition des distances parcourues à vide (TAD)

		Distance à vide (km)	Part de la distance à vide (%) *	Distance vers dépôts (km)	Part distance dépôt (%) **	Distance de fonctionnement (km)	Part distance fonct. (%) **
Constant	Dallas	8 143	45,64	2 640	32,43	5 502	67,57
	Rennes	9 066	46,94	2 766	30,51	6 300	69,49
	Grenoble	12 750	48,40	5 467	42,88	7 283	57,12
	Nice	12 955	48,07	5 182	40,00	7 773	60,00
Hiérarchisé	Dallas	7 910	41,93	2 208	27,91	5 702	72,09
	Rennes	9 654	45,52	2 927	30,32	6 727	69,68
	Grenoble	14 936	50,18	5 477	36,67	9 459	63,33
	Nice	15 155	48,91	6 742	44,49	8 413	55,51

* dans distance totale ** dans distance à vide

Nous constatons également que plus l'indice de détour est important, moins les distances à vide le sont. Cela va avec la tendance générale de l'observation de distances réduites avec l'augmentation de l'indice de détour et de l'efficacité des trajets.

c. Regroupement des passagers

En analysant plus précisément les performances des services de TAD, on remarque des différences dans la capacité de regroupement des clients dans les tournées de TAD.

Il est possible d'évaluer la capacité de regroupement des voyageurs par un système de TAD de deux manières différentes. Le chauffeur du véhicule n'est pas compté.

- le calcul d'une **densité moyenne de remplissage** des véhicules ($Densité_{remptournée}$) (« Développements particuliers dans GREEN-DRT » p.144 – équation 3) qui ne prend en compte que les distances parcourues avec des clients, est pondéré par la distance parcourue. Cette mesure permet d'envisager le partage des véhicules par les usagers sur tout ou partie de leur déplacement :
- le calcul d'un **taux de regroupement** global des clients dans les véhicules ($Tx_{regr.moy_{simu}}$) (« Développements particuliers dans GREEN-DRT » p.144 – équation 5). La totalité des clients concernés par une simulation est répartie de manière uniforme entre les véhicules mobilisés. Cela ne permet pas de faire de distinction entre le fait que les voyageurs aient partagé un même véhicule et l'enchaînement de multiples courses au cours d'une tournée de TAD.

Ainsi, le premier permet d'évaluer le **remplissage** des véhicules par les passagers, alors que le second permet d'analyser la capacité du service de TAD à enchaîner les courses, à **regrouper** des clients dans des tournées. On parlera donc de remplissage dans la première situation et de regroupement dans la seconde. En outre, quelle que soit l'approche, elle est liée à la variation du nombre de véhicules mobilisés pour répondre à une demande de déplacement et à la longueur des tournées. Une augmentation du remplissage peut impliquer une diminution des distances parcourues, même si elle est accompagnée d'une diminution du regroupement, alors qu'une augmentation du regroupement peut potentiellement engendrer une augmentation des distances.

Avec la hiérarchisation des routes et la diminution du nombre de tournées nécessaires pour répondre à la demande de déplacement, et donc la réduction du nombre de véhicules mobilisés, on observe une variation des taux de regroupement et de remplissage (Tableau 25).

Le taux de regroupement pour Dallas (6,6 voy/veh) et Rennes (6,4 voy/veh) sont plus importants que dans les cas de Grenoble et Nice (4,95 voy/veh dans les deux cas). Avec la hiérarchisation, on observe une forte hausse du taux de regroupement pour les deux premiers réseaux, respectivement 8,9 et 7,1 voy/veh, alors que dans les deux autres on observe soit un taux de regroupement équivalent (Grenoble 5,15 voy/veh) soit un taux inférieur (Nice 4,7 voy/veh).

La densité de remplissage s'étend de 0,575 (Nice) à 0,633 (Dallas) dans le cas de vitesse constante sur les réseaux. Si la hiérarchisation des réseaux permet une augmentation de la densité de remplissage dans les cas de Dallas et Rennes (respectivement 7 et 4,9 %), on observe une baisse de celui-ci dans les cas de Grenoble (-3,4 %) et Nice (-4 %).

Tableau 25. Variation du regroupement des clients avec la hiérarchisation des réseaux

		Distance totale (km)	Vit. moy. circul	Nb tourn.	Densité de remp.	Aug. densité de remp.(%)	Aug. absolue densité de remp.	Taux de regroupmt	Aug. taux de regroupmt (%)	Aug. absolue taux de regroupmt
Constant	Dallas	17 842	60	76	0,633			6,579		
	Rennes	19 312	60	78	0,610			6,410		
	Grenoble	26 342	60	101	0,571			4,950		
	Nice	26 950	60	101	0,575			4,950		
Hiérarchisé	Dallas	18 867	102	56	0,678	7,04	0,045	8,929	35,71	2,350
	Rennes	21 207	76	70	0,640	4,92	0,030	7,143	11,43	0,733
	Grenoble	29 765	77	97	0,552	-3,38	-0,019	5,155	4,12	0,204
	Nice	30 988	73	107	0,552	-4,01	-0,023	4,673	-5,61	-0,278

On note que les TAD circulant sur les réseaux de Grenoble et Nice ont la même densité de remplissage (0,552) mais ont un taux de regroupement différent (5,15 pour Grenoble ; 4,7 pour Nice). Il semble donc que ces deux réseaux aient une capacité comparable pour réunir des passagers dans les véhicules mais que le réseau de Grenoble favorise plus l'enchaînement des courses dans les tournées que le réseau de Nice. Quant aux deux autres réseaux, ils semblent favoriser autant le remplissage des véhicules par les clients que l'enchaînement des courses et le regroupement des clients dans des tournées.

On a vu dans cette section la manière dont la morphologie des réseaux peut jouer sur les distances parcourues par les véhicules, que ce soient des véhicules personnels ou des services de TAD. Nous avons constaté la nécessaire balance à faire entre distance parcourue et vitesse appliquée sur le réseau pour obtenir une meilleure efficacité des plus courts chemins en temps sur ce même réseau.

Nous avons également pointé l'impact de l'introduction de vitesses hiérarchisées sur ces mêmes distances. La modification des vitesses sur un réseau routier a un effet indirect sur les distances parcourues en impliquant une modification de la hiérarchie des routes et ainsi le tracé des plus courts chemins en temps.

L'augmentation des distances à un impact direct sur les émissions de polluants (émissions proportionnelles à la distance parcourue). On voit avec des différentes analyses que la performance d'un système de transport (TAD) dépend aussi des caractéristiques du réseau. On le considère comme donné mais connectivité et hiérarchie ont de forts impacts sur les distances parcourues et

ainsi sur les émissions de polluants. Ces paramètres peuvent donc être des leviers d'aménagement efficaces pour une amélioration de la qualité de l'air. Comme le réseau est « hérité », il est plus facile d'agir sur les caractéristiques fonctionnelles (vitesse) que sur les aspects topologiques et morphologiques des réseaux. C'est ce que l'on fait dans la section suivante en testant différents scénarios de vitesse sur un même réseau. Nous analysons ainsi plus précisément l'impact de la vitesse, appliquée sur un réseau routier, sur les émissions de polluants.

5. Variation des quantités de polluants émises selon les vitesses employées et le carburant utilisé

Pour évaluer l'effet des vitesses appliquées aux réseaux, nous effectuons quatre analyses mettant en jeu différents scénarios de vitesse sur un même réseau routier et testons les différents paramètres impliqués dans l'émission de polluants. Nous utilisons ici le réseau routier d'Avignon sur lequel nous appliquons quatre scénarios de vitesse. Nous modélisons successivement le déplacement de 10 000 personnes entre 100 arrêts avec leurs véhicules personnels (VP) et le déplacement de 1 000 personnes entre 59 arrêts en VP et en TAD (plus 8 dépôts pour les TAD). Étant donné que nous utilisons le même réseau routier morphologique, la connectivité est identique dans les différents scénarios. Les résultats que nous obtenons ici sont liés aux seuls effets des scénarios de vitesse appliqués.

La modification des vitesses de manière non proportionnelle engendre inévitablement une modification de la hiérarchie des routes, et ainsi des tracés des plus courts chemins.

Nous travaillons donc avec quatre scénarios de vitesse (Tableau 26). Le réseau *actuel* correspond au réseau observé (vitesses maximales autorisées en place). On applique une augmentation de toutes les vitesses sur le réseau *rapide*. Cela pourrait correspondre au cas où tous les conducteurs dépassent systématiquement les vitesses autorisées. À l'opposé, le réseau *lent* modélise des vitesses systématiquement plus faibles. Cette tendance est d'actualité dans la planification urbaine, car elle permet d'améliorer la sécurité et la compétitivité des modes de transport publics (bus sur voie réservée) ou alternatifs (vélo). Le cas du réseau *homogène* est particulier puisqu'il réduit globalement la variabilité de la vitesse entre les différents types de réseaux. Il tend à diminuer les concentrations spatiales de véhicules sur les sections à grande vitesse.

Tableau 26. Scénarios de vitesses appliqués (km/h)

Actuel	Rapide	Lent	Homogène
90	110	80	80
70	90	65	75
50	60	45	60
35	45	35	45
25	35	25	30

Nous commençons par analyser les effets de la vitesse en regard avec les indices descriptifs des réseaux.

Nous considérons dans un premier temps la totalité des gaz et substances émis par les véhicules.

Nous observons un ordre identique des réseaux simulés pour les émissions, les distances totales parcourues et la vitesse moyenne de circulation. Ce constat est logique compte tenu de la méthode de calcul des émissions. Nous retrouvons donc dans l'ordre les réseaux *rapide* ; *réel* ; *lent* ; *homogène* (Tableau 27). Nous remarquons qu'entre les réseaux *rapide*, *réel* et *lent*, les émissions totales sont différentes de quelques centaines de kilogrammes. En revanche, il y a 2,7 tonnes de polluants d'écart entre le réseau *rapide* (110 t) et le réseau *homogène* (107 t), soit 2,9 % d'écart, ce qui est loin d'être négligeable (Tableau 27). Cela correspond à 5400 km parcourus par un véhicule qui émet 500 g de polluants par kilomètre (pollution moyenne des véhicules modélisés dans GREEN-DRT).

Tableau 27. Émissions produites par 10 000 déplacements sur le réseau d'Avignon

Scénarios de vitesse	Distance totale (km)	Vitesse moyenne de circulation (km/h)	Émissions (t)
Réel	253 3	62,69	109.56
Lent	252 6	62,52	109.27
Rapide	254 8	63,10	109.98
Homogène	246 6	60,44	107.32

En détaillant les situations dans lesquelles les émissions ont été produites, nous remarquons que les quantités d'**émissions à froid** sont très similaires entre les scénarios de vitesse (Tableau 28). Cela est logique étant donné qu'il y a le même nombre de démarrages de véhicules (VP) entre les scénarios. Les petites différences observées relèvent des vitesses pratiquées juste après le démarrage selon les

réseaux. C'est ainsi que l'on observe les quantités d'émissions à froid plus faible de quelques dizaines de kilogrammes sur le réseau *rapide*.

Tableau 28. Répartitions des émissions entre les contextes d'émission selon les scénarios de vitesse sur le réseau d'Avignon (10 000 déplacements)

Scénarios de vitesse	Émissions totales (t)	Émissions à chaud (t)	Émissions à froid (t)	Accélération (t)
Réel	109.56	35.84	47.38	26.41
Lent	109.27	35.74	47.38	26.21
Rapide	109.98	36.03	47.32	26.70
Homogène	107.32	34.99	47.71	24.69

Les **émissions produites à chaud**, qui sont proportionnelles à la distance parcourue, varient un peu plus. Alors que les écarts entre les réseaux rapide, lent et réel se comptent en centaines de kilogrammes, on observe une différence de 1 t entre le réseau *rapide* (36 t) et le réseau homogène (35 t). Ce constat rejoint les conclusions faites précédemment : en engendrant une augmentation des distances parcourues, la hiérarchisation du réseau provoque une augmentation des émissions de polluants produites.

Nous retrouvons le même schéma en ce qui concerne les **émissions en situation d'accélération**. Nous notons une différence jusqu'à 2 t sur le réseau *homogène* (24,7 t) par rapport aux trois autres réseaux (26,7 t dans le cas du réseau *rapide*). Cette observation suit la variation de l'indice d'homogénéité des trajets de chaque réseau.

En comparant ces observations aux indicateurs descriptifs des réseaux, il semble que moins le réseau est performant pour les déplacements, moins il provoque d'émissions de polluants. En effet, l'efficacité des trajets ou encore l'indice de Marchand du réseau *homogène* sont faibles alors qu'il semble être celui qui permet le plus d'économie de polluants. On peut y ajouter l'indice de détour élevé qui informe sur une longueur modérée des plus courts chemins. En revanche, la réciproque n'est pas systématiquement vraie. Un réseau efficace pour les déplacements n'est pas forcément générateur de plus d'émissions de polluants. Cela dépend de la vitesse pratiquée.

C'est donc l'alliance de ces deux indices (Marchand et efficacité à un niveau faible) et de l'indice de détour (à un niveau élevé) qui permet d'identifier un réseau potentiellement moins générateur d'émissions de polluants.

L'homogénéité vitesses sur les réseaux est plus importante que la diminution des vitesses pour une réduction globale des émissions de polluants, élément rarement envisagé dans les politiques urbaines.

Nous étudions désormais ces mêmes scénarios de vitesse avec des effectifs de 1 000 déplacements en VP et en TAD. Avant de comparer les émissions produites par les systèmes de TAD à celles liées à l'utilisation des VP, nous analysons les émissions des VP selon les différents scénarios de vitesse en fonction de chaque polluant selon le carburant (diesel, essence).

A. Différences d'émissions selon le contexte et le carburant

Étudiées dans leur globalité (masse de toutes substances et gaz confondus), les différences d'émission selon que le diesel ou l'essence est employé ne sont pas significatives. Les émissions produites par l'utilisation du diesel sont légèrement plus importantes que celles liées à l'utilisation de l'essence (cela se compte en centaines de kilogrammes de polluants). En étudiant les émissions selon le contexte dans lequel elles ont été produites (Tableau 29), on remarque que les émissions à chaud et les émissions à froid sont plus importantes de quelques centaines de kilogrammes dans le cas de l'utilisation de l'essence et que les surémissions liées à des accélérations sont nettement plus importantes avec le diesel qu'avec l'essence (jusqu'à 2 t de plus dans le cas du réseau *rapide*).

Tableau 29. Répartition des émissions entre les contextes d'émission selon les scénarios de vitesse et les carburants (Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)

	Scénario	Émissions totales (t)	Émissions à chaud		Émissions à froid		Accélération	
			t	%	t	%	t	%
Essence	Réel	11.14	3.12	28.0	7.64	68.6	0.38	3.4
	Lent	11.14	3.16	28.4	7.66	68.7	0.32	2.9
	Rapide	11.27	3.15	27.9	7.62	67.6	0.51	4.5
	Homogène	10.81	2.97	27.5	7.57	70.0	0.27	2.5
Diesel	Réel	11.76	2.52	21.4	7.28	61.9	1.97	16.7
	Lent	11.53	2.54	22.1	7.29	63.3	1.69	14.7
	Rapide	12.46	2.56	20.5	7.25	58.2	2.65	21.3
	Homogène	10.99	2.40	21.9	7.21	65.6	1.38	12.6

En détaillant les émissions selon les polluants et gaz à effet de serre (Tableau 30), on remarque la large prépondérance des émissions de CO₂, quel que soit le carburant. En effet, elles représentent 98 % des émissions résultant de la combustion du diesel et 80 % de celles issues de l'essence. Les

autres polluants représentent donc des quantités bien plus faibles. Avec des effets néfastes même à de très faible concentration dans l'air, il est toutefois nécessaire de les considérer.

La production de NOx avec le diesel est 4,5 fois plus importante que celle provoquée par l'utilisation de l'essence. Celle de microparticules (PM) est deux fois plus importante. L'utilisation de l'essence provoque, elle, plus d'émissions de CO et de COV (respectivement 15 fois et 120 fois plus).

Tableau 30. Quantité d'émissions de chaque polluants et GES selon le carburant et le scénario de vitesse (VP)
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)

	Scénario	Émissions totales (t)	CO2 (t)	NOx (t)	CO (t)	PM (t)	COV (t)
Essence	Réel	11.14	8.98	0.0129	1.7822	0.0003	0.3625
	Lent	11.14	8.98	0.013	1.7854	0.0003	0.3632
	Rapide	11.27	9.12	0.0128	1.7790	0.00031	0.3615
	Homogène	10.81	8.67	0.0127	1.7648	0.0003	0.3588
Diesel	Réel	11.76	11.58	0.0602	0.1163	0.0007	0.0035
	Lent	11.53	11.35	0.0596	0.1167	0.0007	0.0035
	Rapide	12.46	12.28	0.0632	0.1157	0.00069	0.0035
	Homogène	10.99	10.82	0.0581	0.1150	0.00062	0.0034

- L'utilisation du diesel engendre une émission plus importante de CO₂

Sans minimiser les effets du CO et des COV, la question des concentrations de NOx et de microparticules (PM) dans l'atmosphère urbaine est devenue une question de santé publique. Nous avons vu que l'utilisation du diesel provoque une émission plus importante de ces gaz dans l'atmosphère. Toutefois, jusque récemment (été 2013), les pouvoirs publics français préconisaient l'utilisation de ce carburant en favorisant l'achat de véhicules diesel en leur appliquant un « bonus écologique ». Néanmoins, la prépondérance du parc de véhicules diesels en France est tel (près de 80 %) qu'il faudra quelques décennies pour observer une réduction significative de leur nombre. Celui-ci est attribué à un véhicule selon la quantité de CO₂ émise au kilomètre, indicateur privilégié de l'effet de serre. Les valeurs les plus récentes mesurées par les constructeurs sont d'environ 100 g par kilomètre pour une berline moyenne diesel contre 130 g par kilomètre pour un moteur essence (valeur avancée pour une nouvelle Renault Megane). Selon ces données, un moteur diesel émet **1,3 fois moins** de CO₂ qu'un moteur essence. Pourtant, nous avons constaté avec l'utilisation de notre modèle qu'un véhicule diesel émet globalement **1,3 fois plus** de CO₂ qu'un véhicule essence, avec en moyenne une émission de 650 g/km pour un véhicule diesel et de 500 g/ km pour un véhicule essence.

En analysant les données en sortie de nos simulations, nous constatons que les valeurs communiquées par les constructeurs font référence aux seules émissions produites lors de la circulation « à chaud » par les véhicules, sans changement de vitesse, en maintenant une vitesse moyenne optimale. Nous calculons dans ces conditions de circulation une émission de 141 g/km en moyenne pour un véhicule diesel et de 175 g/km pour un véhicule essence. La différence des valeurs kilométriques entre celles des constructeurs et les nôtres est due d'une part à la modélisation de véhicules plus anciens dans GREEN (normes Euro 4 contre Euro 6) et d'autre part parce que nos véhicules ne circulent pas forcément à la vitesse optimale pour la minimisation des émissions de CO₂. Le rapport entre les deux valeurs obtenues avec notre modèle est tout à fait semblable à celui entre les valeurs communiquées par les constructeurs (les émissions kilométriques sont **1,24 fois plus importantes** pour un véhicule essence).

Les valeurs avancées par les constructeurs et validées par les pouvoirs publics français, ne sont donc pas erronées mais sont incomplètes et ne correspondent pas à l'usage normal d'un véhicule. Lorsque l'on considère toutes les émissions de CO₂ survenant lors de l'usage normal d'un véhicule, les véhicules diesel émettent de plus grandes quantités de CO₂ que les véhicules essence.

Conséquence de différents choix politiques (dont le prix des carburants), la grande majorité des taxis utilise des véhicules diesel. Nous simulons donc, par la suite, uniquement des flottes de TAD composées de monospaces ou minibus diesel. Les VP modélisés pour étalonner les valeurs utilisent donc eux aussi le diesel.

B. Le réseau homogène contribue de manière significative à la réduction des différents polluants

Nous comparons désormais les quantités de polluants émises selon chaque scénario de vitesse.

Les valeurs des émissions du réseau *homogène* sont les plus faibles. Quel que soit le polluant considéré, la position de chaque type de réseau reste inchangée. Nous observons quelques légères variations selon le carburant. Nous obtenons donc par ordre décroissant d'émission : *rapide* > *lent* > *réel* > *homogène*.

Pour ce qui est du CO₂, on constate donc des écarts de valeurs différents selon que les véhicules utilisent l'essence ou le gasoil. Pour l'essence, le réseau *homogène* permet de sauver un peu moins d'une demi-tonne de CO₂, soit environ 4 % des émissions totales du réseau *rapide*. Pour un véhicule privé

familial émettant 500 g/km (toutes situations d'émissions confondues), cela constitue près de 880 km parcourus, représentant 5 % de l'ensemble de la distance parcourue par les véhicules sur le réseau *rapide*. Pour les véhicules diesel, ce constat est similaire mais encore plus marqué, puisque la différence entre le réseau *homogène* et le réseau *rapide* (plus d'une tonne et demi de CO₂, soit 76 % de plus) permet potentiellement d'économiser 2 250 kilomètres parcourus (véhicule émettant 650 g/km).

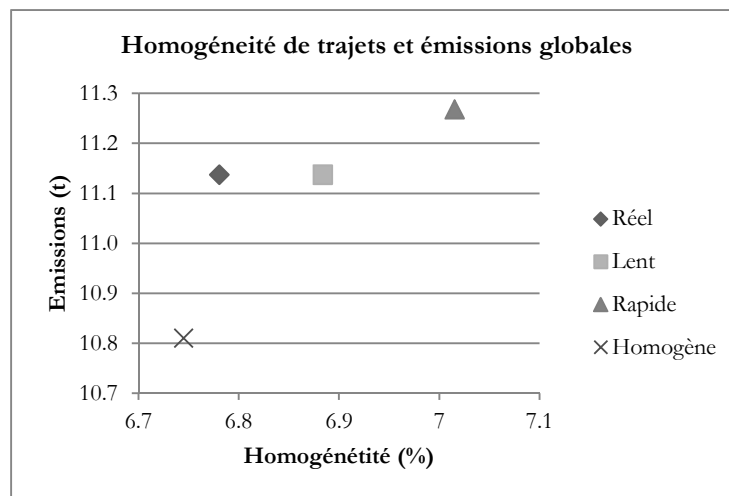
Les résultats observés sont similaires pour les émissions de NOx. L'utilisation de l'essence permet d'économiser 288 g de NOx sur le réseau *homogène* par rapport au réseau *lent*, ce qui correspond à 480 km (on considère une émission moyenne de 0,6 g/km, quel que soit le carburant), soit près de 3% de la distance totale. L'usage du diesel sur le réseau *homogène*, lui, permet d'économiser plus de 5 kg de NOx, soit 8% des émissions de NOx sur le réseau *rapide*. Cela correspond à plus de 3 000 km, 17% de la distance totale sur le réseau *rapide*.

Un réseau avec des vitesses plus homogènes semble ainsi permettre une réduction de la quantité de polluants émis par les véhicules, quel que soit le carburant employé.

a. Le degré d'homogénéité de la vitesse explique le niveau d'émission

Sur un réseau *rapide* ayant des vitesses plus hétérogènes selon les sections de route, les automobilistes ont tendance à réaliser des trajets plus longs, car les détours leur permettent d'accéder à des voies plus rapides. Dans ce contexte, le réseau *homogène* permet de réduire les distances parcourues, mais cela n'est pas la principale explication. Il est en effet intéressant de considérer la répartition de la vitesse moyenne sur les différentes sections des réseaux simulés. Plus précisément, il convient d'observer la distribution (statistique et spatiale) des changements de vitesse (Graphique 3). Par exemple, une valeur élevée de l'indice *H* décrit la plus grande hétérogénéité des vitesses pour les réseaux *rapide* (70%) et *lent* (69%). Le positionnement du modèle GREEN-DRT à l'échelle du tronçon de route permet d'analyser la composition des trajets effectués. C'est ce qui nous permet de calculer le niveau d'homogénéité des trajets.

Graphique 3. Position des différents types de réseaux selon leur niveau d'émission globale et l'homogénéité des vitesses (Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)



L'effet de l'hétérogénéité des vitesses est encore plus visible par l'observation des surémissions liées aux accélérations et décélérations des véhicules. Pour les véhicules diesel, qui émettent davantage lors des changements de vitesse, ces émissions sont pratiquement doublées entre un réseau *homogène* et un réseau *rapide*. Par rapport au réseau *homogène*, elles représentent une augmentation de 42 % pour le réseau *actuel*, et même 22 % pour le réseau *lent*.

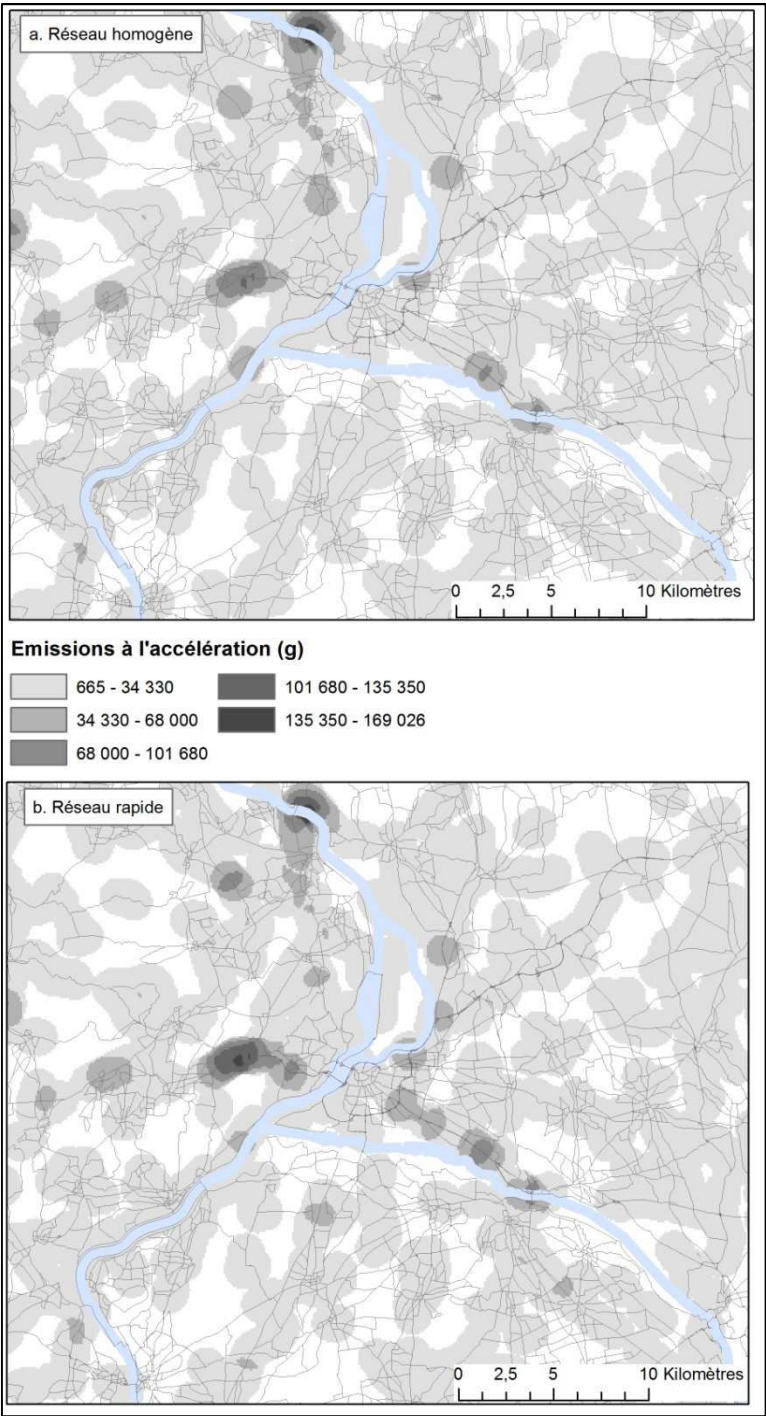
b. Localisation des émissions liées à l'accélération sur le réseau routier

Au-delà d'une analyse globale des polluants émis par les véhicules, il est pertinent de s'intéresser leur dimension spatiale et d'évaluer l'impact local des pratiques de mobilité par les ménages utilisant leur voiture personnelle. Pour préciser les analyses, il est intéressant d'étudier la localisation de la source des émissions.

Notre méthodologie permet de répondre à ce besoin. En effet, GREEN-DRT rend possible la cartographie des surémissions liées aux accélérations sur le réseau. Leur localisation coïncide bien évidemment à celle des lieux de rupture de vitesse.

Les écarts de surémissions à l'accélération que l'on observe de manière globale entre les scénarios de vitesse ont une dimension spatiale forte (Carte 2). Si les localisations spécifiques de surémission de polluants lors d'accélérations sont les mêmes pour les scénarios de vitesse *homogène* (Carte 2a) ou *rapide* (Carte 2b), on note des différences de quantités de polluants. Les quelques lieux particuliers qui provoquent de fortes surémissions d'accélération, quel que soit le scénario de vitesse, se situent globalement en périphérie, sur les axes principaux menant au centre-ville.

Carte 2. Localisation des émissions à l'accélération
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)

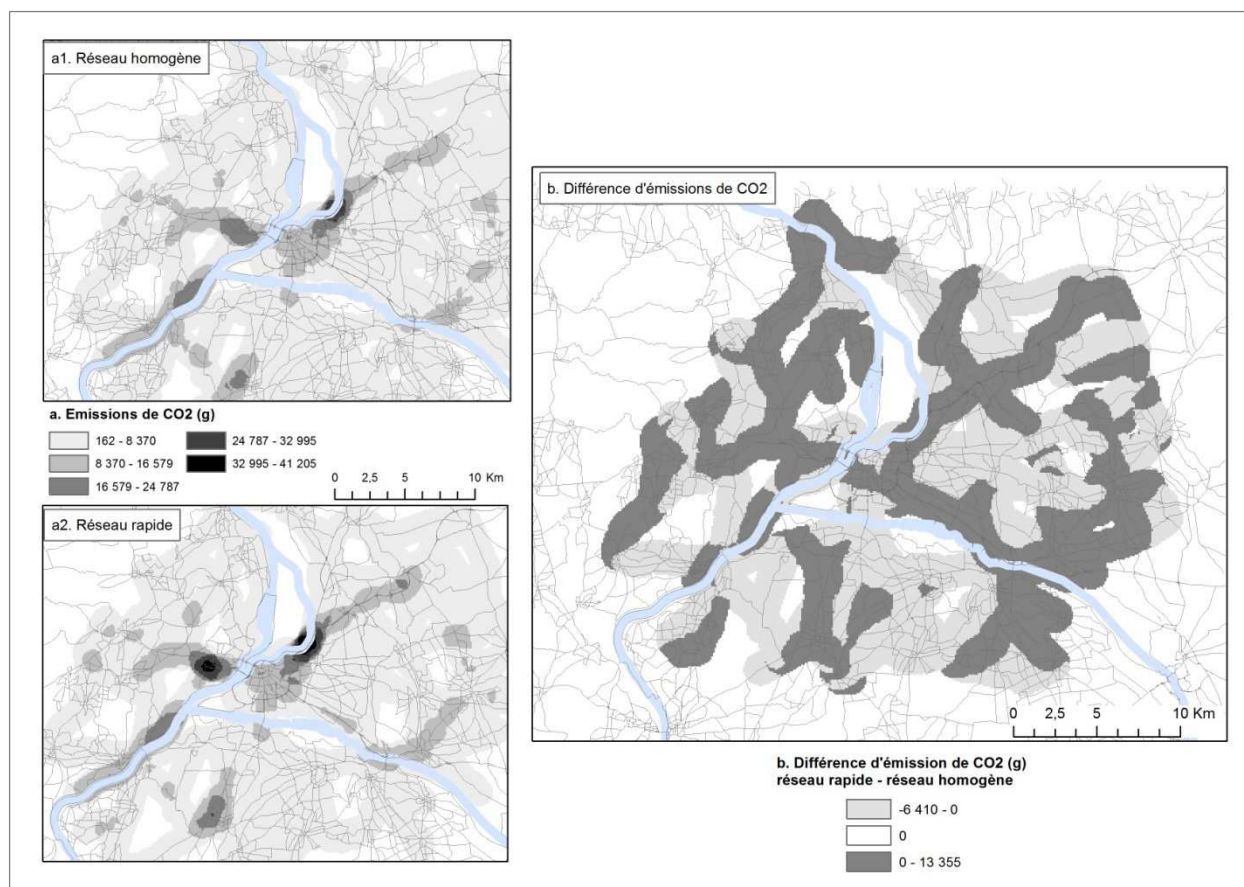


Toutefois, même si les réseaux rapides sont défavorables en termes d'émission de polluants atmosphériques, ils apportent d'autres avantages aux ménages. En effet, ils réduisent de 13 à 35 % les temps de parcours des véhicules personnels par rapport aux autres réseaux. Ce gain de temps est largement dû à une augmentation moyenne de la vitesse sur les tronçons les plus rapides (autoroute ou double voie par exemple). Plus exactement, la structure des réseaux rapides engendre une meilleure efficacité en termes d'accessibilité, grâce à une forte hiérarchie des vitesses (Foltête, Genre-Grandpierre et Josselin, 2011). Les politiques de planification urbaine sont pourtant aujourd'hui orientées vers une réduction de ce type de déplacements (Dupuy, 1999 ; Genre-Grandpierre, 2011). L'action politique sur les niveaux d'émission de polluants atmosphériques résulte donc directement d'un arbitrage entre les temps de déplacement des ménages et l'application d'une réduction voire d'une homogénéisation généralisée des vitesses sur le réseau.

C. Répartition spatiale et points chauds d'émissions de polluants selon les vitesses appliquées

Comme nous pouvons le constater sur la Carte 3, des vitesses élevées induisent des concentrations de pollution périphériques, notamment sur des corridors ou des « points chauds ». Même si elle ne correspond pas à des volumes locaux de gaz émis très importants, la différence d'émission de CO₂ entre ces deux réseaux est très marquée (Carte 3.b). Son empreinte (couleur foncée) dessine des canyons et des poches de production de polluants atmosphériques, au centre-ville comme en périphérie.

Carte 3. Émission de CO₂ (g) - a.1 réseau homogène ; a.2 réseau rapide ; b. différence d'émission de CO₂ (rapide – homogène) (*Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000*)



Comme nous pouvions nous y attendre, plus la hiérarchie des vitesses est élevée, plus il apparaît des points de concentration des émissions. Cela est lié à la centralité intermédiaire (Freeman, 1977), caractéristique des réseaux qui met en évidence une structuration des déplacements sur les axes principaux. Elle permet d'identifier les tronçons qui entrent dans la composition du plus grand nombre de plus courts chemins. Plus un réseau est hiérarchisé, plus les émissions de polluants sont concentrées. En d'autres termes, la hiérarchie des vitesses n'est pas favorable à une dispersion des flux, comme l'explique la théorie du mouvement naturel (Penn *et al.*, 1998).

D. Comparaison des quantités d'émission produites entre l'usage des véhicules privés et les TAD

Dans l'absolu, le fonctionnement des TAD, en réponse à la même demande de déplacement qu'en VP, provoque une augmentation de plus de 40 % des distances (42 % *rapide* ; 47 % *homogène*). Plus de 25 000 km sont parcourus par les TAD contre moins de 18 000 km par les VP (Tableau 31). Pourtant, l'utilisation des véhicules personnels implique une augmentation des émissions globales de 21 % (*rapide*) à 27,5 % (*homogène*) par rapport à l'utilisation des TAD.

Tableau 31. Comparaison des émissions entre VP et TAD selon les scénarios de vitesse
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)

		Émissions (t)	Distance (km)
TAD	Réel	8.96	25 838
	Lent	8.51	25 627
	Rapide	9.80	25 379
	Homogène	7.97	25 534
VP	Réel	11.76	17 733
	Lent	11.53	17 712
	Rapide	12.46	17 903
	Homogène	10.99	17 374

En analysant les quantités d'émissions produites selon le contexte, nous remarquons la prépondérance des émissions à froid dans le cas des VP (Tableau 32 ; Graphique 4). En effet, alors que l'utilisation des TAD induit des émissions à chaud et des accélérations plus importantes que les VP (valeurs proches du double), les émissions à froid provoquées par ceux-ci sont plus de huit fois supérieures ($> 7,2 \text{ t} - \text{VP}$; $< 0,9 \text{ t} - \text{TAD}$).

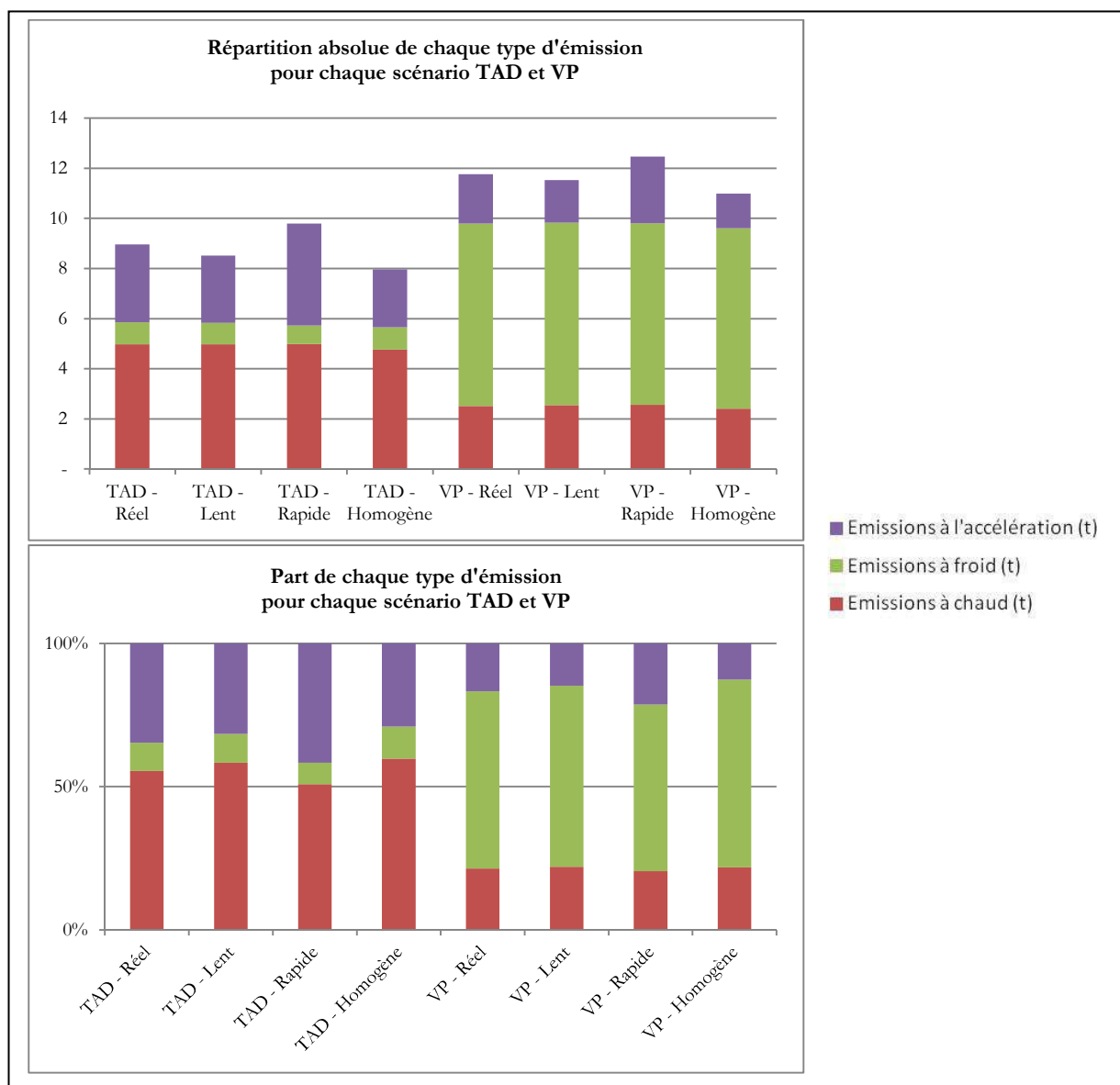
Tableau 32. Répartition des émissions selon situations TAD – VP

(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)

		Émissions (t)	Émissions à chaud (t)	Émissions à froid (t)	Émissions à l'accélération (t)
TAD	Réel	8.96	4.97	0.88	3.11
	Lent	8.51	4.97	0.85	2.69
	Rapide	9.80	4.98	0.74	4.08
	Homogène	7.97	4.77	0.89	2.31
VP	Réel	11.76	2.52	7.28	1.97
	Lent	11.53	2.54	7.29	1.69
	Rapide	12.46	2.56	7.25	2.65
	Homogène	10.99	2.40	7.21	1.38

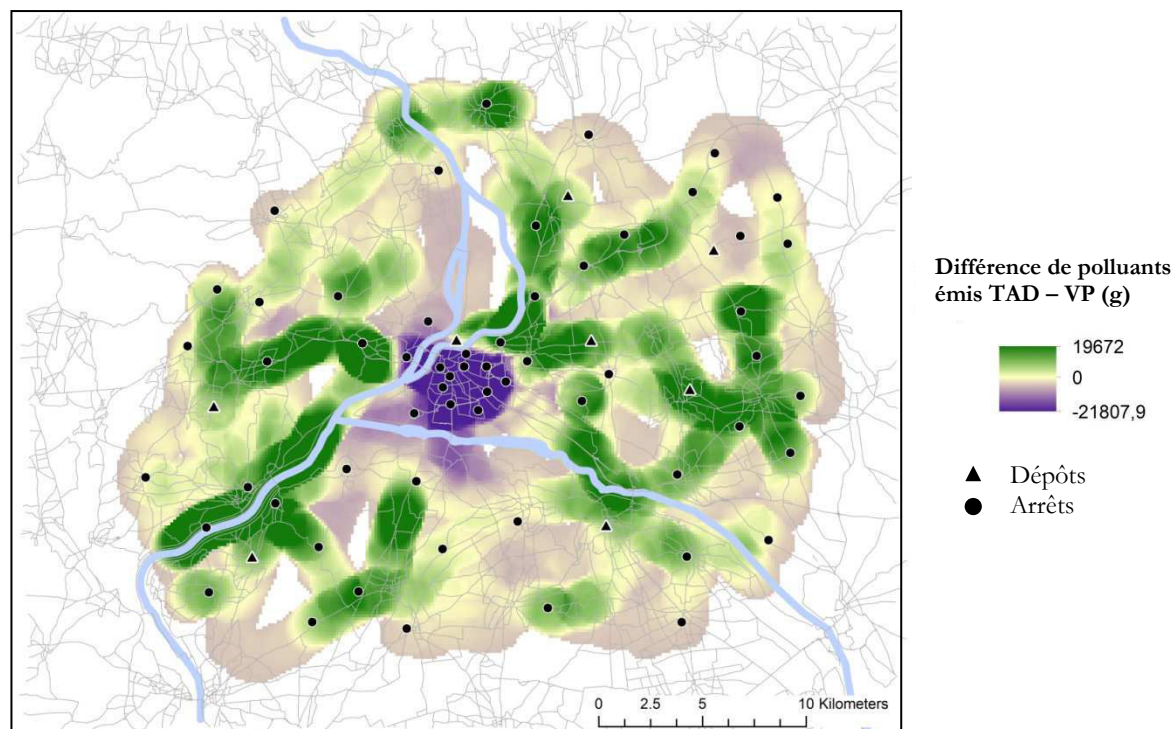
Graphique 4. Répartition absolue et relatives des émissions selon contexte et scénario

(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)



La différence d'émissions entre TAD et VP tient principalement de la diminution du nombre de démarrages de véhicules qui compensent largement les émissions supplémentaires engendrées par l'augmentation des distances parcourues par des TAD. Cela s'observe de manière très nette sur la Carte 4 qui présente la différence d'émissions produites par les VP et par les TAD sur le réseau. La position centrale où les émissions de polluants issues de l'usage des VP sont supérieures à celles provenant des TAD (en violet) est la conséquence des émissions à froid liées aux démarrages des véhicules au niveau des arrêts. La concentration des arrêts au centre de la ville, situation qui peut représenter les situations de forte densité urbaine, influe directement sur la présence de cette poche d'émissions. Les lieux où les émissions issues du fonctionnement du TAD sont supérieures à celles produites par les VP (en vert) sont localisés en périphérie, autour des dépôts.

Carte 4. Différences de localisation des émissions de polluants entre VP et TAD
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; scénario aléatoire, fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)



Les gains d'émissions effectués grâce au TAD relèvent donc de la capacité de ce système à réduire le nombre de véhicules mobilisés en regroupant les clients et les courses dans des tournées et de son fonctionnement quasi-continu, permettant de maintenir les moteurs chauds.

6. Réduire le nombre de véhicules et des émissions de polluants avec l'usage des TAD

Comme nous venons de l'identifier, le seul démarrage et les tous premiers kilomètres parcourus par un véhicule de type berline diesel impliquent 43% des émissions globales produites au cours d'un trajet d'une longueur moyenne de 25 km (part d'autant plus importante que la longueur du trajet est faible). Il s'agit donc de comprendre et d'évaluer l'impact des différents paramètres pouvant permettre une réduction du nombre de véhicules utilisés avec la mise en place d'un système de TAD et ainsi proposer un système de transport meilleur du point de vue environnemental.

Après avoir établi les différents impacts des scénarios de vitesse sur les émissions de polluants par les VP dans la section précédente, nous cherchons désormais à établir de la même manière la capacité d'un TAD à minimiser les émissions de polluants en réduisant entre autres le nombre de véhicules mobilisés.

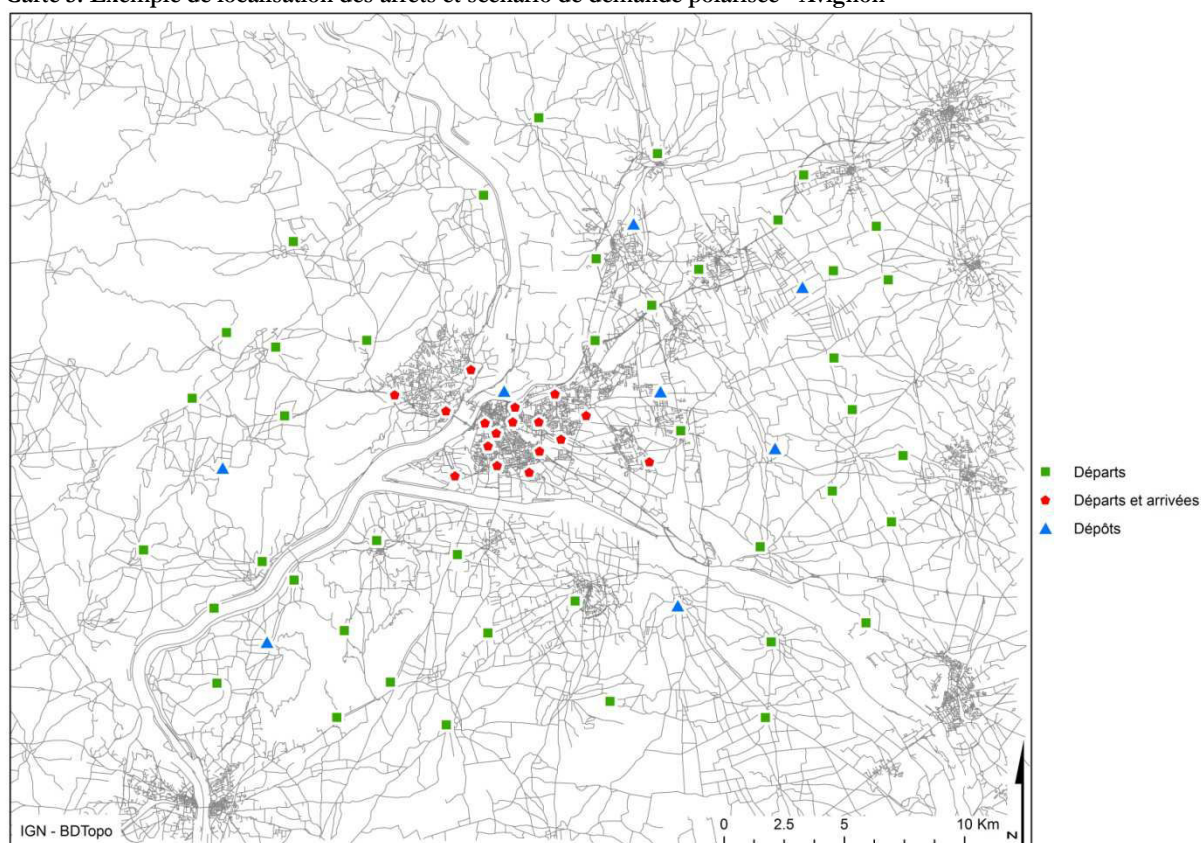
Dans la deuxième partie, nous avons identifié trois distributions-type de déplacements sur un territoire (voir « Des configurations spatiales » p. 111) : un schéma suivant lequel les déplacements sont massifiés autant en origine et destination qu'en horaires ; un second dans lequel les flux sont polarisés vers des centres d'importance différente ; un dernier où les flux de déplacements sont très variés dans le temps et dans l'espace (espace apolarisé). Il est possible de modéliser un système de TAD en adéquation avec chacun de ces schémas de flux et ainsi déterminer leurs spécificités pour qu'ils minimisent les émissions globales de polluants. Nous les analysons dans la suite de cette partie. Nous cherchons à déterminer quels sont les meilleurs paramètres de fonctionnement d'un TAD pour minimiser les émissions de polluants, ainsi que les émissions globales, selon les caractéristiques des territoires.

Le regroupement des clients dans les véhicules, qui permet la réduction du nombre de véhicules, est possible si le nombre de demande est suffisant, si la marge de temps accordée par les clients est suffisante (fenêtre de temps) et si la taille du territoire sur lequel le TAD est déployé est adaptée (de la zone urbaine au territoire régional). Le regroupement dépend également de la composition spatio-temporelle des demandes et du réseau routier. Celui-ci peut favoriser les déplacements (selon la vitesse) et ainsi faciliter le regroupement. Ces éléments constituent les paramètres des différents scénarios simulés.

Dans le premier cas de répartition spatio-temporelle de la demande, la modélisation d'un TAD en rabattement vers un lieu (un ou plusieurs arrêts concentrés dans un espace restreint) depuis diverses origines dans un intervalle de temps restreint illustre notre analyse dans la partie « Exemple de TAD déployé sur un territoire non-polarisé (toutes directions) » p. 233.

Pour le deuxième cas, les déplacements sont eux aussi dirigés vers un ou plusieurs centres, mais se répartissent sur toute une journée. Nous modélisons un même scénario de déploiement d'un TAD selon lequel soit la localisation des arrêts elle-même concentre intrinsèquement les flux vers certains pôles, soit les demandes de déplacement sont spécifiquement dirigées vers certains arrêts (partie « Exemple de TAD mis en place en réponse à des demandes de déplacements concentrés » p. 230). Avec la Carte 5, nous présentons un exemple de scénario de déploiement d'un TAD en réponse à des demandes polarisées. Dans cet exemple, le rabattement est modélisé avec une concentration des arrêts de destination au centre de la ville la première moitié de la journée et inversement l'après-midi et le soir.

Carte 5. Exemple de localisation des arrêts et scénario de demande polarisée - Avignon



Pour le troisième cas, nous modélisons un TAD qui répond à des demandes de déplacements durant toute une journée, de manière équiprobable entre les arrêts prédéfinis de manière aléatoire, sans

réelle concentration de certains arrêts dans l'espace (voir « Performances d'un TAD en réponse à une demande de déplacements polarisés » p. 210). Avec ce panel de modélisations, nous nous focalisons sur l'impact de la forme de la demande sur les performances des services de TAD, selon leurs caractéristiques fonctionnelles propres. Nous testons chaque modélisation de manière à en déterminer les conditions optimales de déploiement pour minimiser les émissions de polluants.

Au travers de ces analyses, nous abordons l'importance de la fenêtre de temps et de la montée en charge dans la minimisation des émissions de polluants selon le scénario, mais également selon l'échelle du territoire sur lequel le TAD est déployé.

Différents paramètres peuvent donc jouer sur la réduction du nombre de véhicules employés pour répondre à une demande de déplacements. Différents leviers existent, chacun ayant ses limites de mise en œuvre. Il est néanmoins important de ne pas brader la qualité de service en vertu d'un meilleur regroupement des clients et d'une réduction des émissions de polluant sans quoi les services de TAD ne pourraient concurrencer la liberté, la flexibilité et l'efficacité apportées par l'usage des véhicules personnels. Il est donc nécessaire de les analyser de façon à trouver un bon équilibre entre les deux.

A. La vitesse permet un meilleur regroupement, ce qui induit une augmentation des temps de trajets pour les clients

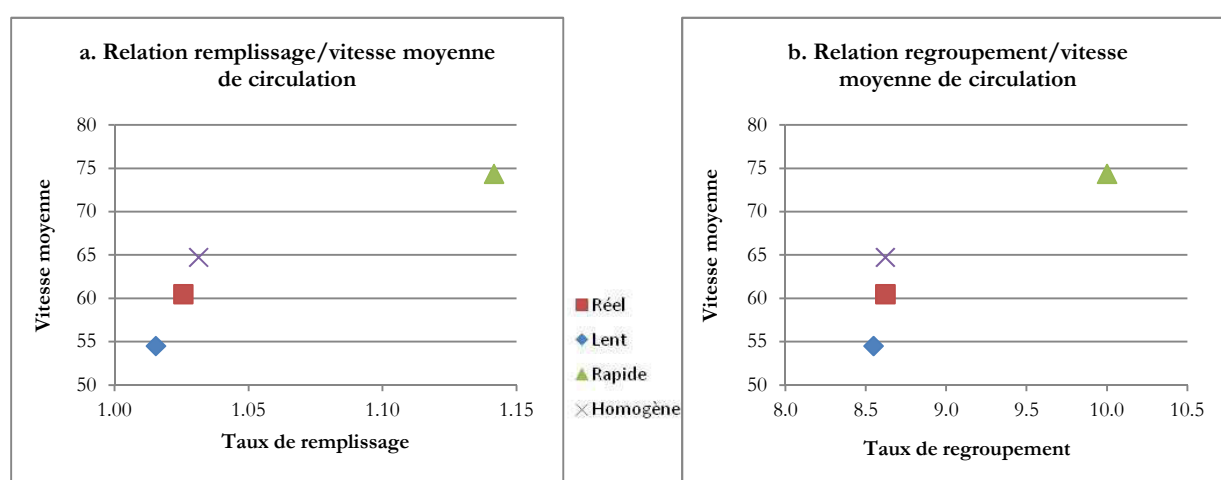
Avec une fenêtre de temps de 15 minutes, on observe un meilleur remplissage des véhicules et un meilleur regroupement des courses au sein des tournées sur le réseau *rapide* (Tableau 33). Cela implique néanmoins un temps moyen passé par les clients dans le véhicule plus important (3,25 minutes contre 2,83 minutes sur le réseau *lent*). En effet, plus la vitesse de circulation est élevée, plus il est possible de faire des détours. On s'éloigne ainsi du temps de trajet optimal, ce qui signifie une augmentation du temps de trajet pour les usagers.

On observe que le remplissage des véhicules est meilleur sur le réseau *homogène* que sur le réseau *réel*. Cela semble lié à la vitesse moyenne de circulation sur les réseaux (Graphique 5).

Tableau 33. Regroupement et remplissage selon les scénarios de vitesse

	Vitesse moyenne de circulation	Densité de remplissage	Taux de regroupement (%)	Tps supp course (mn)
Réel	60.5	1.026	8.6	3.01
Lent	54.5	1.015	8.5	2.83
Rapide	74.4	1.142	10	3.25
Homogène	64.7	1.031	8.6	2.92

Graphique 5. Vitesse moyenne de circulation et remplissage/regroupement



Il semble ainsi que, globalement, le regroupement augmente avec la vitesse mais que les temps de trajet clients augmentent dans le même temps. Se pose alors la question de quel élément privilégier : l'environnement ou le temps de trajet et la qualité de service ?

B. Des seuils « environnementaux » de TAD variés selon la distribution spatio-temporelle de la demande

Dans cette section, nous analysons les seuils à partir desquels un service de TAD peut être pertinent d'un point de vue environnemental. Pour cela, nous utilisons des simulations effectuées sur les trois niveaux sur le territoire breton et d'autres sur Avignon avec lesquels nous testons l'impact de l'échelle de déploiement du service, le nombre de demandes de courses et la fenêtre de temps sur leurs performances. Nous déclinons ces analyses pour des TAD mis en place pour répondre aux trois configurations de flux identifiées précédemment.

a. Performances d'un TAD en réponse à une demande de déplacements polarisés

Pour chaque niveau identifié sur le territoire de Bretagne dans la partie « Présentation des cas d'étude » p.166, nous avons localisé des arrêts et des dépôts (au niveau 1 : 59 arrêts et 5 dépôts ; au niveau 2 : 37 arrêts et 4 dépôts ; au niveau 3 : 39 arrêts et 3 dépôts). Au niveau 1 (région Bretagne) et niveau 2 (agglomération de Rennes), les arrêts correspondent aux mairies des villes de plus de 10 000 habitants. Au niveau 3 (ville de Rennes) les arrêts sont situés à proximité de lieux d'intérêt (hôpital, bâtiments administratifs, centres commerciaux etc.). Les dépôts ont été localisés de manière aléatoire sur les trois niveaux.

Bien qu'on ait remarqué l'influence négative de la localisation des dépôts sur les distances parcourues par les véhicules des services de TAD, nous conservons les distances d'approche depuis les dépôts dont les localisations ne sont pas optimisées dans les analyses. Cela correspond à une réalité : les transporteurs n'ont pas le choix de la localisation des dépôts de véhicules, ils s'adaptent. Si le service de TAD est assuré par des taxis, ceux-ci stockent généralement leur véhicule à leur domicile. De plus, ces distances sont inévitables et inhérentes au fonctionnement des TAD. On adopte ainsi une position pessimiste (voir « Distances à vide » p. 186).

On modélise à chaque niveau des scénarios de déplacements réalisés avec un service de TAD qui croisent des variations de la fenêtre de temps autorisée par les clients (5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 30 mn) avec une augmentation du nombre de demandes de déplacements à satisfaire (50 ; 100 ; 200 ; 500 ; 1 000). Ces configurations doivent permettre de tester à la fois l'effet des fenêtres de temps et de la montée en charge sur les performances d'un système de TAD, selon différentes échelles de déploiement. Le scénario global utilisé ici modélise des demandes de déplacements tout au long d'une journée entre tous les arrêts localisés de manière indifférenciée. On se positionne ainsi dans le **deuxième cas de répartition de la demande** sur le territoire (voir « Des configurations temporelles » p. 114).

- Plus le territoire est grand, moins le regroupement est possible

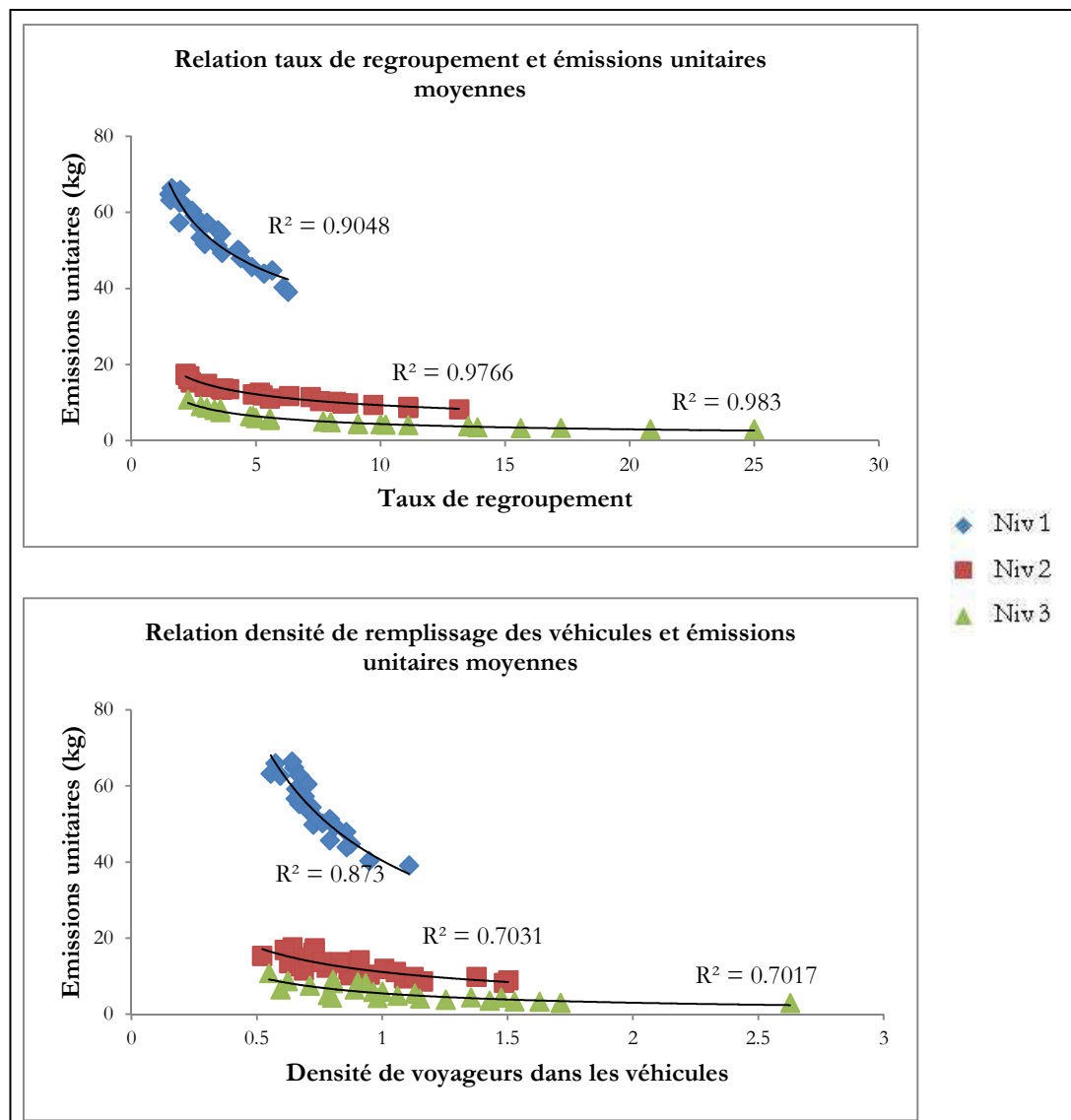
En normalisant les quantités d'émissions en les rapportant à la course, on note que quel que soit le territoire considéré et l'échelle de déploiement du TAD, la relation entre les quantités d'émissions unitaires moyennes et le taux de regroupement, ou de remplissage, suit une loi puissance (avec une nuance pour le niveau 1 qui est pratiquement linéaire). Plus le taux de regroupement ou de remplissage augmente, plus les émissions unitaires sont réduites (Graphique 6), puisqu'on réduit le nombre de véhicules roulant.

La comparaison de cette relation sur les trois niveaux d'analyse du territoire de Bretagne met en évidence que le gain est plus important pour les grands territoires et donc pour des distances parcourues élevées. Ainsi, sur un territoire de grande envergure, une petite amélioration du regroupement permet une réduction plus importante des émissions unitaires.

Les relations entre les émissions unitaires et les taux de regroupement ou les densités de remplissage sont similaires, avec une relation plus forte entre émissions unitaires et taux de regroupement. En effet, le coefficient de corrélation est supérieur à 0,90 alors que pour la relation avec la densité de voyageurs la valeur de R^2 va de 0,70 pour les niveaux 2 et 3 à 0,87 pour le niveau 1 (région Bretagne), ce qui reste correct.

Le **remplissage des véhicules** est donc meilleur aux niveaux 2 (agglomération de Rennes) et 3 (Rennes). Par contre, le potentiel d'économie de polluants est plus important au niveau 1. Une légère augmentation du taux de remplissage des véhicules peut permettre l'économie de **quelques dizaines de kilogrammes de polluants par voyageur (20 km pour 10 kilogrammes de polluants)**. On observe le même phénomène si on augmente (même légèrement) la **possibilité d'enchaîner les courses**. On peut y parvenir en augmentant par exemple la densité d'arrêts sur le territoire ou le nombre de demandes. Les résultats observés laissent à penser que cela a un effet indéniable et rapide.

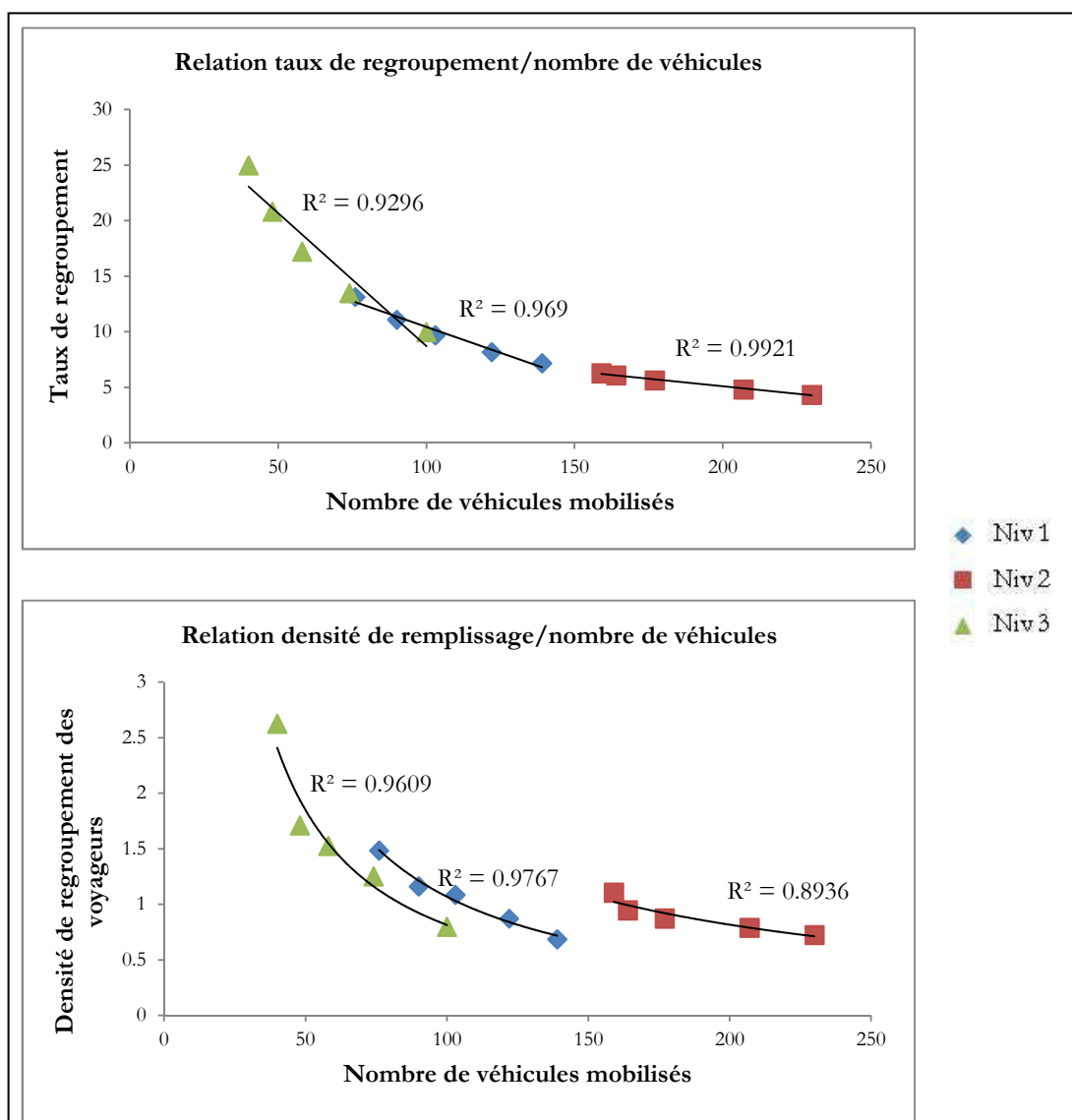
Graphique 6. Émissions et regroupement selon échelle de déploiement d'un TAD
(fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)



Niv 1 : région Bretagne ; Niv 2 : agglomération de Rennes ; Niv 3 : ville de Rennes

Il ressort de l'analyse entre le **taux de regroupement** et le **nombre de véhicules** que plus le territoire est grand (les distances à parcourir sont plus grandes) moins il est possible de regrouper les passagers dans les véhicules et ainsi réduire le nombre de véhicules utilisés. Le nombre de véhicules augmente donc avec les distances parcourues, directement liées aux distances à parcourir pour relier les arrêts. À l'opposé, plus le territoire est réduit, avec une connectivité du réseau qui permet l'optimisation des itinéraires, plus il est possible de minimiser le nombre de véhicules rapidement. En effet, une augmentation du regroupement même faible peut permettre une réduction significative du nombre de véhicules mobilisés.

Graphique 7. Nombre de véhicules et regroupement/remplissage selon échelle de déploiement d'un TAD
(fenêtre de temps = 15 mn, nombre de courses = 1 000)



La comparaison des trois niveaux étudiés en Bretagne met en évidence une augmentation de l'impact **l'allongement des distances parcourues sur le nombre de véhicules** mobilisés. Ainsi, au niveau 3, cas du réseau urbain de Rennes, le nombre de véhicules mobilisés ne semble pas trop dépendre des distances parcourues. Cela semble tenir d'une meilleure capacité à enchaîner les courses au sein des tournées, du fait de la proximité des arrêts entre eux (densité des arrêts).

La réduction du nombre de véhicules utilisés et ainsi des quantités de polluants émises tient donc autant du partage des véhicules par les passagers qu'à la possibilité d'enchaîner des courses au sein d'une unique tournée TAD.

Le TAD ne semble donc pas adapté à toutes les échelles de territoire. Plus il est important, plus le regroupement des clients est compliqué et pour qu'il permette une réduction globale des émissions de polluants sur le territoire, il est nécessaire que le report modal depuis l'automobile soit très important et que les usagers soient prêts à « sacrifier » du temps. Pourtant, en France, on remarque que les services de TAD sont préférentiellement installés dans des espaces ruraux, peu denses.

Au-delà de la taille du territoire qui n'est pas flexible, définie a priori par l'opérateur, apparaît la question d'identification des leviers pouvant faciliter cette réduction du nombre de véhicules mobilisés en général.

- L'augmentation de la fenêtre de temps et du nombre de voyageurs engendre une diminution des émissions de polluants

Pour améliorer les performances d'un système de TAD, il est possible de mobiliser deux paramètres : l'amplitude de la fenêtre de temps autorisés par les clients et la quantité de demandes de déplacements en TAD sur une plage horaire donnée.

On analyse les effets de la variation de chaque paramètre sur les différents aspects de fonctionnement du système de TAD séparément. Pour analyser l'effet de l'augmentation de la fenêtre de temps, on compare les résultats pour un effectif de demande fixe (1 000 demandes). De la même manière, pour évaluer l'effet de la montée en charge, on considère une fenêtre de temps de 15 minutes.

Tableau complet des résultats présenté dans l'Annexe 6 p. 253.

- *L'effet de la variation de la fenêtre de temps*

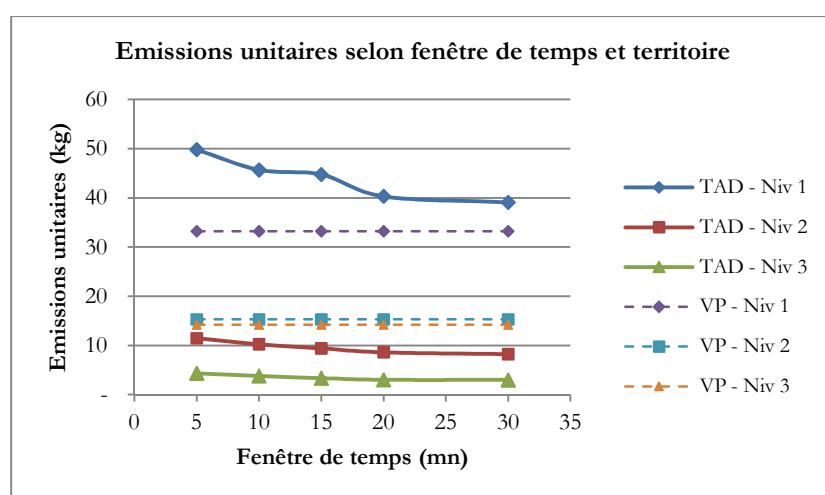
Pour 1 000 demandes, on fait varier la fenêtre de temps autorisée pour l'optimisation des tournées : 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 30 minutes. Pour un véhicule roulant à 70 km/h, 1 minute permet de parcourir 1,2 km supplémentaire ; 1 km pour une vitesse de 60 km/h et 830 mètres pour une vitesse de 50 km/h.

Le Graphique 8 permet de comparer pour chaque niveau d'analyse les émissions unitaires, c'est-à-dire par client, produites avec un TAD ou en VP pour les mêmes déplacements. On cherche à déterminer les seuils de fenêtre de temps à partir desquelles l'utilisation d'un TAD permet une réduction d'émissions par rapport à l'utilisation des véhicules personnels. En VP, la fenêtre de

temps n'a aucune signification puisqu'il n'y a aucun détour. Les émissions unitaires pour les VP sont donc constantes.

Quel que soit le niveau, l'augmentation de la fenêtre de temps permet une réduction des émissions unitaires de manière plus ou moins marquée (Graphique 8). La diminution des émissions unitaires est plus importante au niveau 3 (-31,2 %) qu'au niveau 1 (-21,5 %). Toutefois, on distingue deux situations : une première où 30 minutes ne suffisent pas pour que le système de TAD permette une économie d'émissions (niveau 1) par rapport à l'utilisation des VP et une deuxième situation où cinq minutes suffisent pour que le TAD soit pertinent (niveaux 2 et 3).

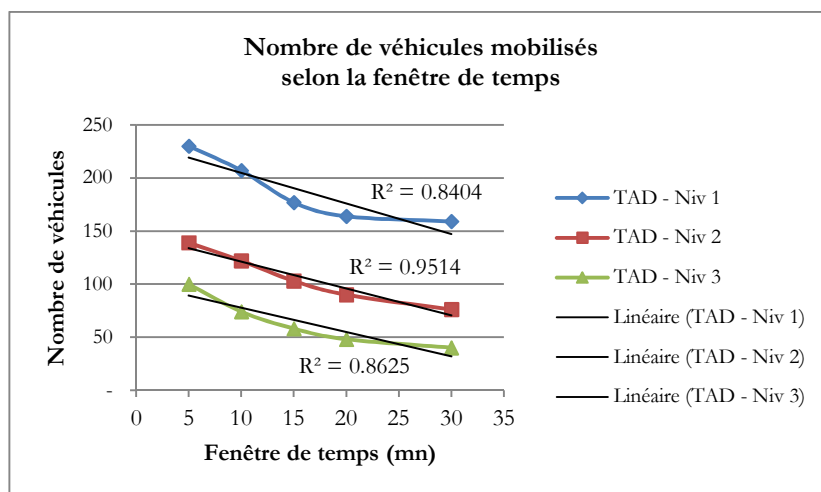
Graphique 8. Diminution des émissions unitaires avec l'augmentation de la fenêtre de temps selon l'échelle de déploiement du TAD



Niv 1	-21,5 %
Niv 2	-28 %
Niv 3	-31,2 %

En même temps que les émissions unitaires diminuent avec l'augmentation des fenêtres de temps, le nombre de véhicules mobilisés également (R^2 de 0,84 au niveau 1 à 0,95 pour le niveau 2) (Graphique 9). Nous observons ainsi une réduction de -31 % du nombre de véhicules au niveau 1, de -45 % au niveau 2 et jusqu'à -60 % au niveau 3.

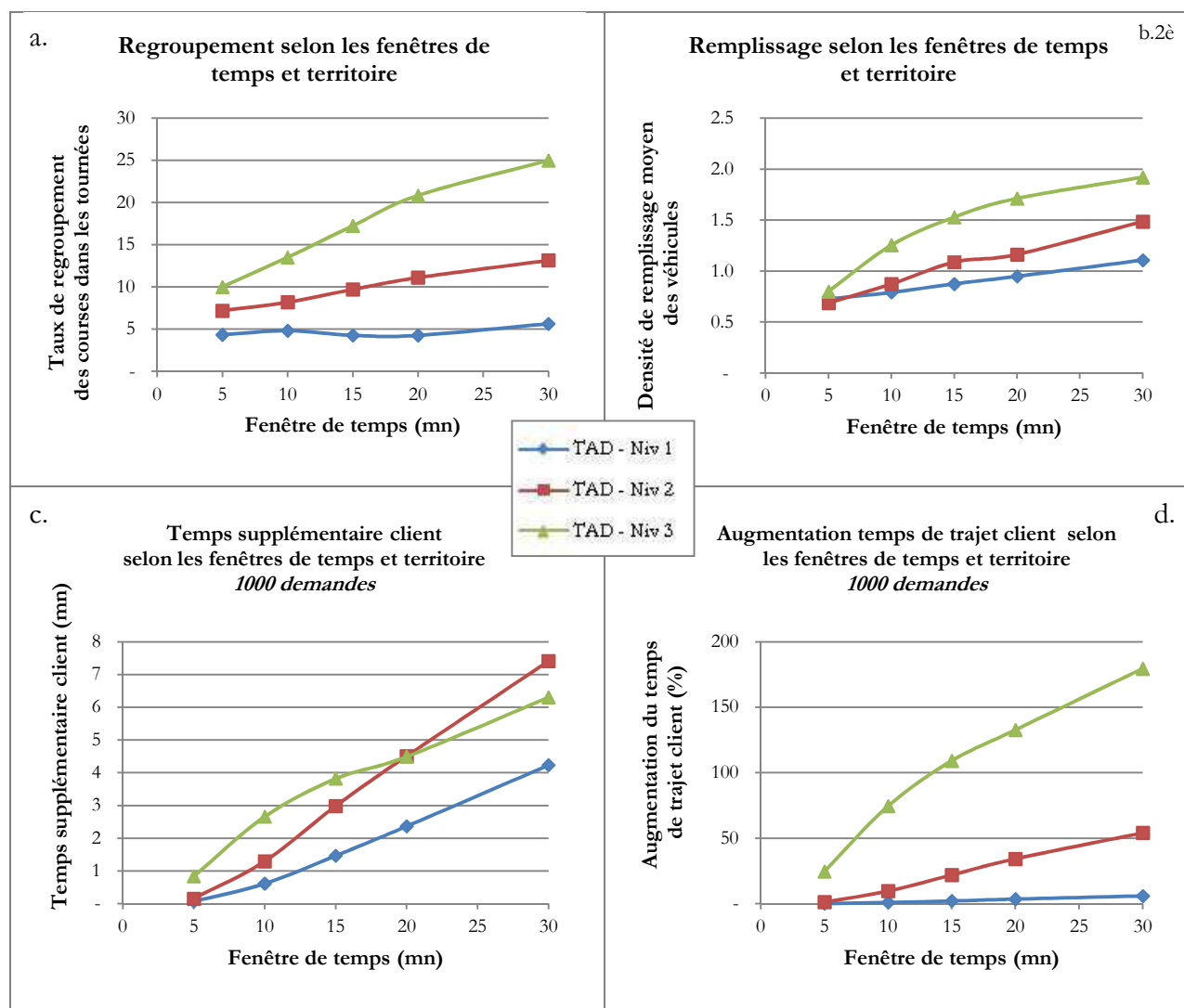
Graphique 9. Diminution du nombre de véhicules utilisés avec l'augmentation de la fenêtre de temps selon l'échelle de déploiement du TAD (%)



Niv 1	-31 %
Niv 2	-45 %
Niv 3	-60 %

C'est sans grande surprise que l'on constate une augmentation plus importante du taux de regroupement au niveau 3 avec l'augmentation des fenêtres de temps (Graphique 10.a). Au niveau 2, le même constat peut être fait dans une moindre mesure. Par contre, au niveau 1, la relation n'est pas aussi forte. Il augmente légèrement après, mais ce n'est pas très significatif. Le regroupement est pratiquement stable entre 5 et 20 minutes de fenêtre de temps car il n'y a peu de possibilités pour effectuer les détours nécessaires au regroupement dans le respect des temps imposés. En revanche, pour ce qui est du remplissage des véhicules au niveau 1 (Graphique 10.b), on remarque une relation linéaire positive avec l'augmentation de la fenêtre de temps. Cette relation aux deux autres niveaux est tout de même plus importante. On constate que les trois relations (trois niveaux) se différencient avec l'augmentation de la fenêtre de temps. Avec 5 minutes de flexibilité, la densité de remplissage moyenne est équivalente entre les niveaux d'analyse (entre 0,69 et 0,8). Avec l'augmentation de la fenêtre de temps, les écarts se creusent entre les trois niveaux, avec des valeurs toujours plus importantes pour le niveau 3. Il semble qu'à ce même niveau la relation tende vers un plafond qui se situe à une moyenne de 2 passagers simultanés dans les véhicules.

Graphique 10. Variation des différentes performances des TAD avec l'augmentation de la fenêtre de temps
(nombre de courses = 1 000 ; niv 1 : 59 arrêts, 5 dépôts ; niv 2 : 37 arrêts, 4 dépôts ; niv 3 : 39 arrêts, 3 dépôts)



Comme nous l'avons déjà signalé, aussi économe en émissions de polluants qu'un TAD puisse être par rapport à l'usage des VP, il ne doit pas sacrifier le temps de trajet des clients. Il est en effet nécessaire d'assurer un bon niveau de service. Cela passe en partie par le maintien de durées de trajets raisonnables par rapport au temps optimal de déplacement en VP. Nous analysons donc le temps supplémentaire moyen de trajets en TAD par rapport au temps de trajets en VP (Graphique 10.c). Nous constatons de manière logique une augmentation du temps de voyage des clients avec l'augmentation de la fenêtre de temps quel que soit le niveau d'analyse. Néanmoins, nous remarquons qu'en moyenne les détours inhérents au fonctionnement des TAD imposent aux clients des temps de déplacement supplémentaires bien inférieurs à la marge qu'ils autorisent. Nous notons également des temps supplémentaires plus importants lorsque le TAD est déployé sur un territoire

plus restreint. Cela correspond à la meilleure capacité de regroupement sur ces mêmes territoires. On y observe donc une réduction du nombre de véhicules et ainsi des émissions de polluants.

Regardons également ce que ce temps supplémentaire représente par rapport à la durée totale du trajet en VP et calculons la majoration du temps de trajet en TAD par rapport au temps en VP (Graphique 10.d). Il en ressort des majorations jusqu'à 180 % des temps de voyage, soit près de 3 fois le temps de parcours en VP (fenêtre de temps de 30 mn, niveau 3). On observe ainsi une augmentation des temps de trajet de 6,30 mn en moyenne.

Nous constatons ainsi que plus les distances à parcourir sont réduites, plus les regroupement et remplissage sont facilités et rendus possibles. Les temps de trajets moyens des clients en sont pénalisés, à cause des détours engendrés (jusqu'à 7,40 mn en moyenne pour une fenêtre de temps de 30 mn et 1 000 demandes sur le niveau 2). Comme nous l'avons déjà observé (partie « Souplesse temps/espace : les clés de l'optimisation » p. 117), des usagers peuvent être plus impactés que d'autres selon le déroulement de la tournée.

L'augmentation de la fenêtre de temps permet une amélioration globale des performances des TAD et ce quelle que soit l'échelle de déploiement du service. Celle-ci est d'autant plus perceptible que cette échelle est réduite. Plus le territoire de déploiement est grand, plus la marge de temps nécessaire pour réduire les émissions de polluants globales avec un service de TAD est importante. Néanmoins, la décroissance des émissions de polluants unitaires avec l'accroissement de la fenêtre de temps implique une majoration variable de temps de trajets pour les clients. Ainsi se pose la question de la priorité que l'on donne au temps et à la qualité de l'air dans le choix de son mode de transport.

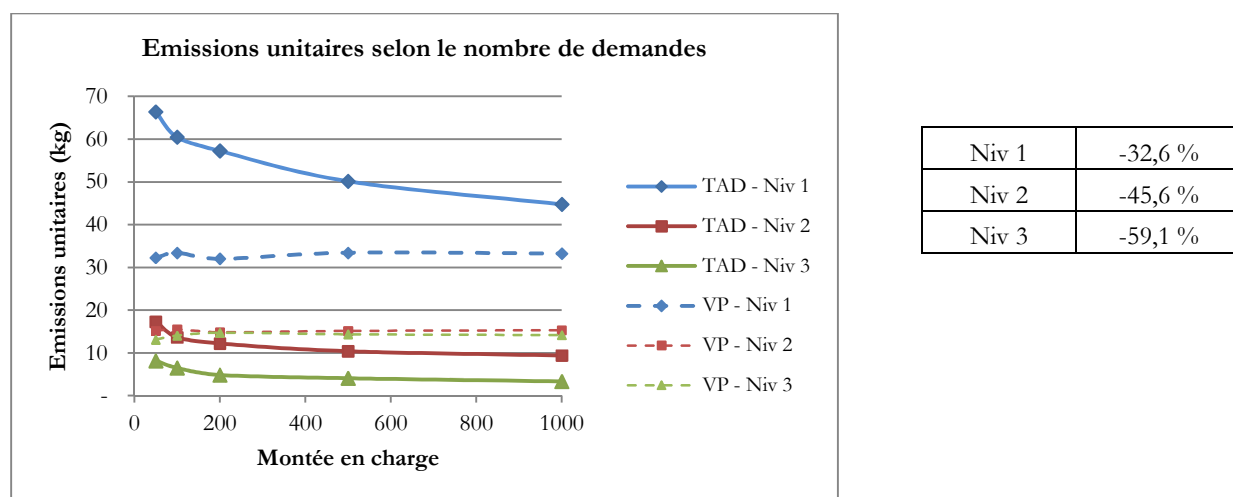
- *L'effet de la montée en charge*

Parallèlement à la flexibilité temporelle des clients dans leurs déplacements, l'augmentation du nombre de demandes peut jouer sur les performances des TAD. Pour effectuer cette analyse, nous fixons la fenêtre de temps à 15 mn et faisons varier les effectifs de demande (50 ; 100 ; 200 ; 500 ; 1 000).

L'augmentation du nombre de demandes de déplacement en TAD permet de réduire les émissions de polluants unitaires (Graphique 11). Selon l'échelle de déploiement du service de TAD, son

utilisation permet soit d'économiser des émissions de polluants par rapport à l'usage des VP par sa seule mise en place (nombre de demandes inférieures à 50 - niveau 3), soit nécessite un nombre de demandes de déplacement minimal pour obtenir cette réduction (environ 100 demandes - niveau 2). Dans le cas du TAD modélisé sur le territoire de la région Bretagne, bien que la montée en charge permette une diminution des quantités d'émissions moyennes par voyageur, pour que l'usage des TAD soit plus rentable (du point de vue des émissions de polluants) que celui des VP, il est nécessaire qu'il y ait un nombre de déplacements supérieur à 1 000. En définitive, plus les distances à parcourir sont importantes, plus le nombre de déplacements effectués en TAD doit être conséquent pour que le service permette une réduction globale des émissions de polluants.

Graphique 11. Diminution des émissions unitaires avec la montée en charge selon l'échelle de déploiement du TAD



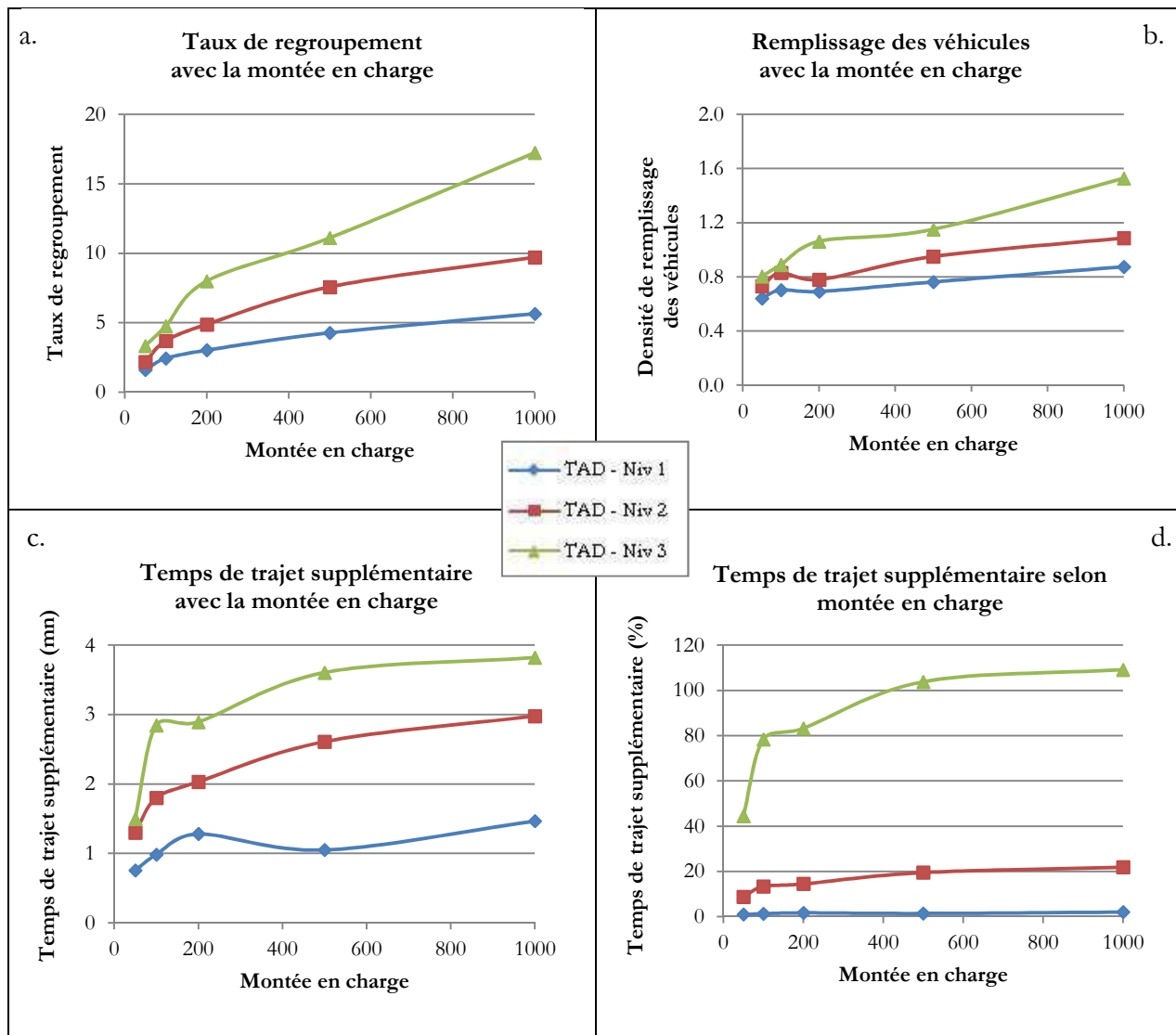
Plus globalement, la montée en charge permet de réduire de -33% (niveau 1) à -59% (niveau 3) les émissions de polluants unitaires.

Ce constat est lié à la capacité de regroupement propre à chaque échelle de déploiement (Graphique 12.a) qui augmente avec la montée en charge. Le remplissage des véhicules est lui aussi amélioré avec la montée en charge (Graphique 12.b) mais dans une moindre mesure.

Il en va de même quant à la majoration des temps de trajet plus importante avec la montée en charge sur les territoires de faible ampleur, avec une échelle de déploiement du TAD plus réduite (Graphique 12.c). On remarque toutefois une croissance fluctuante de cette relation. Dans le cas du niveau 3, le temps supplémentaire double entre 50 et 100 demandes alors que dans le cas du niveau 2, la progression est plus régulière, et double entre 50 et 1 000 demandes. Comme avec l'augmentation de la fenêtre de temps, en contrepartie de l'amélioration du regroupement des

courses, on constate une forte augmentation des temps de trajets (Graphique 12.d), notamment au niveau 3, de 1:30 minutes (50 demandes) à 3:50 mn (1 000 demandes).

Graphique 12. Variation de différentes performances des TAD avec la montée en charge



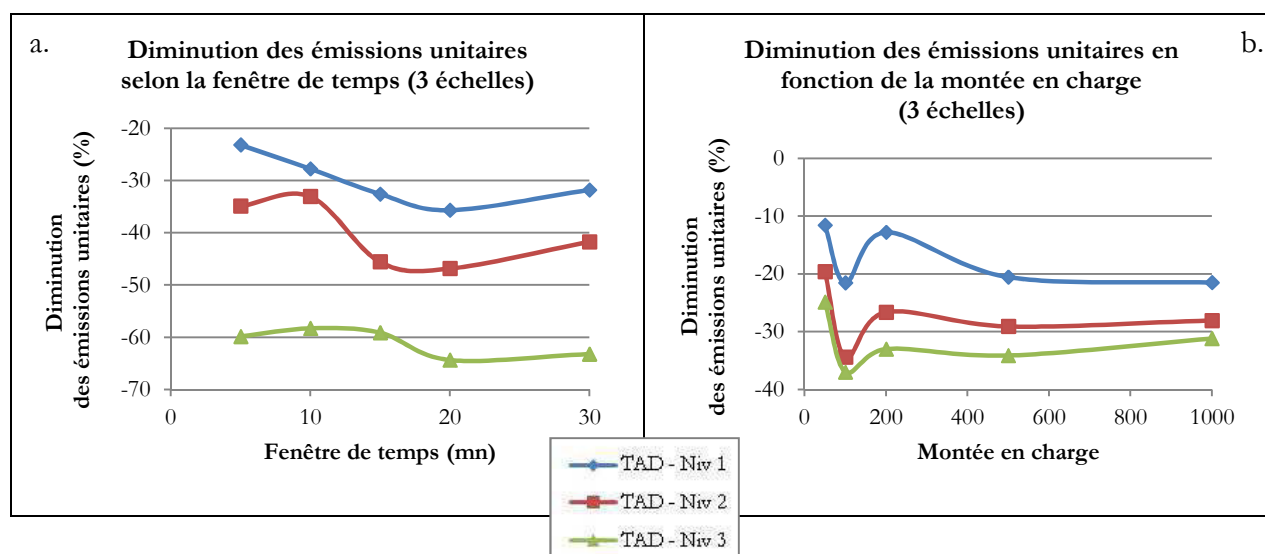
De la même manière qu'avec l'augmentation de la fenêtre de temps, nous observons qu'une montée en charge même légère permet une réduction conséquente des émissions de polluants. Cela est encore directement lié à une plus grande capacité de regroupement des courses dans les tournées avec l'augmentation des demandes de déplacement et ainsi de la probabilité accrue qu'elles soient similaires dans le temps et dans l'espace.

Pour que le système de TAD permette une réduction globale des émissions de polluants par rapport à celles provoquées par l'usage des véhicules personnels, l'échelle de déploiement a une grande importance. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, pour qu'un service de TAD mis en place sur un territoire régional atteigne ce seuil, il est nécessaire qu'il y ait un très grand nombre de demandes de déplacements pour favoriser leur regroupement dans des tournées. Il paraît ainsi que, tel que nous l'avons simulé ici, le TAD ne soit pas pertinent pour une diminution globale des émissions sur un large territoire.

Montée en charge et fenêtre de temps ont donc toutes deux une influence sur la capacité de regroupement et de remplissage des véhicules, et, en conséquence, sur les émissions de polluants globales. Toutefois, chacune à une influence particulière.

Nous comparons maintenant la diminution des émissions unitaires provoquée d'une part par la montée en charge (entre 50 et 1 000 demandes) selon la fenêtre de temps autorisée (Graphique 13.a) et d'autre part, par l'effet de l'augmentation de la fenêtre de temps (entre 5 et 30 mn) en fonction du nombre de courses effectuées (Graphique 13.b). On calcule pour chaque pas de variation (en abscisse) la diminution d'émissions par rapport au pas minimal (5 mn pour la fenêtre de temps ; 50 demandes pour la montée en charge). Par exemple, dans le premier graphique (Graphique 13.a), pour le niveau 3 (courbe verte), on lit que pour une fenêtre de temps de 20 mn, un gain de près de 65% des émissions unitaires est fait, en conséquence de l'augmentation de la demande (de 50 à 1 000). Les parts de diminution ne renseignent pas sur le gain propre à chaque pas de la variable en abscisse, mais elles permettent d'identifier les variations d'un point de vue global.

Graphique 13. Diminution des émissions unitaires avec la montée en charge (a) et la fenêtre de temps (b)



Avec le premier graphique (Graphique 13.a), nous constatons que, quelle que soit l'échelle de déploiement du TAD, la diminution des émissions unitaires liées à la montée en charge est plus importante avec une fenêtre de temps de 20 minutes, dans des proportions différentes selon le territoire. Le second graphique (Graphique 13.b) nous permet de constater une diminution des émissions unitaires liées à la variation de la fenêtre de temps relativement stable à partir de 100 demandes. On remarque tout de même une forte inflexion autour de 100 demandes pour les trois échelles.

- *Des configurations optimales pour minimiser les émissions de polluants*

Pour compléter cette analyse, nous standardisons les diminutions d'émissions à l'unité (une demande ou une minute selon le cas) induites, d'une part, par la montée en charge (ligne du haut – optimums en gris clair), d'autre part, celle imputable à la fenêtre de temps (ligne du bas – optimums en gris foncé) (Tableau 34, Tableau 36 et Tableau 38). Nous additionnons dans un deuxième temps les proportions de gain selon chaque paramètre d'analyse (Tableaux Tableau 35, Tableau 37 et Tableau 39). Ces analyses informent sur les gains d'émissions de polluants à l'unité (minute ou demande), pour chaque intervalle étudié. Cela nous permet d'identifier les configurations fenêtre de temps/nombre de demandes optimales pour la réduction des émissions de polluants pour chaque territoire étudié. Ces analyses ne renseignent pas sur la supériorité du TAD sur les VP en quantités de polluants émises. Pour cela, se référer aux graphiques p. 215 et p. 219. Elles représentent les gains faits entre différentes configurations du TAD. Par exemple, dans le Tableau 34, il faut comprendre que pour une fenêtre de temps située entre 15 et 20 mn et un nombre de demandes situé entre

100 et 200, la fenêtre de temps permet une diminution de -13,9% des émissions unitaires et le nombre de demandes une diminution de -31%. Cette valeur est un optimum. Comme nous pouvons le voir dans le Tableau 35, cette configuration est optimale (diminution totale de -44,9%). On note qu'elle n'est pas composée de deux optimaux. C'est bien une configuration optimale qu'on analyse, pas les valeurs optimum elles-mêmes.

Tableau 34. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps – Niveau 1
valeurs en %

		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	3.48	-1.53	-17.82	-29.77	-19.45
		-4.89	-9.70	8.89	-3.09	-16.53
	10 -- 15	-28.23	-11.45	-10.59	-7.66	-9.11
		7.49	-5.44	-4.78	-11.72	-3.05
	15 -- 20	-5.99	-19.99	-30.99	-16.37	-27.66
		-7.44	-15.70	-13.88	-5.91	-13.26
	20 -- 30	-19.80	-32.10	-21.56	-31.86	-21.99
		-12.84	-4.52	-5.62	-12.59	-4.53

Tableau 35. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 1
valeurs en %

		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	-1.41	-11.23	-8.93	-32.87	-35.98
	10 -- 15	-20.73	-16.88	-15.37	-19.38	-12.16
	15 -- 20	-13.43	-35.70	-44.88	-22.28	-40.92
	20 -- 30	-32.64	-36.62	-27.18	-44.45	-26.52

Dans le cas du niveau 1 (Tableau 34 et Tableau 35), il semble y avoir deux configurations plus favorables à la diminution des émissions unitaires. Une première pour une fenêtre de temps entre 15 et 20 mn, et entre 100 et 200 demandes (-44,9 %). Une seconde apparaît pour une fenêtre de temps entre 20 et 30 mn et une demande entre 200 et 500 (-44,5%). Il paraît ainsi se dessiner un seuil à 20 mn et 200 demandes. Cela rejoint l'analyse du Graphique 13. Diminution des émissions unitaires avec la montée en charge (a) et la fenêtre de temps (b) On remarque tout de même que si la configuration est optimale, les gains effectués grâce à la fenêtre de temps sont toujours moindres que ceux fait avec la montée en charge. De plus, dans les **configurations optimales** qui se

dégagent, les fenêtres de temps ne sont pas des optimums. Néanmoins, pour optimiser le service de TAD du point de vue des émissions de polluants, il paraît plus nécessaire d'imposer une flexibilité horaire plus importante aux clients que d'en augmenter le nombre. Toutefois, le seuil de 200 demandes est une valeur optimale pour un gain plus rapide d'émissions de polluants mais ne suffit pas pour permettre une réduction globale des émissions. Il est nécessaire qu'il y ait plus de demandes pour que le service soit compétitif par rapport à l'usage des VP.

Dans le cas du niveau 2 (Tableau 36 et Tableau 37), une unique configuration optimale se dégage. Une demande importante (1 000 demandes) avec une fenêtre de temps réduite (entre 5 et 10 mn) semblent permettre un gain d'émissions bien supérieur aux autres configurations. Contrairement aux observations faites pour le niveau 1, l'effet de la montée en charge dans cette configuration n'est pas un optimum (-21 %). Par contre, l'effet de l'augmentation de la fenêtre de temps est parmi les plus importants (-43 %).

Tableau 36. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps – Niveau 2
valeurs en %

		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	-26.06	-23.25	2.13	-13.29	-21.14
		-8.04	-4.95	-42.02	-30.79	-43.37
	10 -- 15	19.39	-12.81	-14.80	-17.10	-12.26
		-41.41	-18.64	-21.27	-26.34	-22.60
	15 -- 20	-8.34	0.55	-3.24	-7.87	-11.27
		-15.28	-33.19	-36.88	-44.47	-23.16
	20 -- 30	-19.06	-28.79	-26.18	-13.35	-6.48
		-17.75	-25.40	-19.05	-23.95	-15.09

Tableau 37. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 2
valeurs en %

		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	-34.10	-28.20	-39.89	-44.08	-64.50
	10 -- 15	-22.02	-31.45	-36.07	-43.44	-34.87
	15 -- 20	-23.62	-32.63	-40.12	-52.34	-34.43
	20 -- 30	-36.80	-54.19	-45.23	-37.29	-21.57

Sur ce territoire à dominance périurbaine, pour améliorer les performances environnementales du service, il paraît plus pertinent de favoriser son utilisation sans pour autant imposer des temps de

détours très importants aux clients. L'arbitrage entre qualité de service et environnement nécessite moins de compromis.

On retrouve la même tendance pour le niveau 3. En effet, les configurations optimales se situent pour une fenêtre de temps réduite (entre 5 et 10 mn) et des effectifs de demandes importantes (Tableau 39). On observe tout de même une réduction du nombre de demandes permettant un meilleur gain d'émissions de polluants (à partir de 200 demandes). Chacune des deux configurations optimales est en même temps soit un optimum de gain avec la fenêtre de temps (-32 %), soit un optimum de gain avec la montée en charge (-65 %) (Tableau 38).

Tableau 38. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps – Niveau 3
valeurs en %

		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	-39.22	-34.11	-41.33	-58.26	-65.15
		-31.34	-25.97	-20.37	-31.93	-24.76
	10 -- 15	-49.77	-44.94	-50.36	-51.87	-40.32
		-15.32	-21.18	-25.68	-5.63	-18.01
	15 -- 20	-56.18	-68.64	-39.39	-49.84	-59.42
		3.97	-10.68	-11.92	-17.94	-13.69
	20 -- 30	-28.51	-21.20	-36.52	-30.49	-20.80
		-5.49	-12.51	-1.79	-8.88	-0.81

Tableau 39. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 3
valeurs en %

		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	-70.56	-60.08	-61.71	-90.18	-89.91
	10 -- 15	-65.08	-66.12	-76.04	-57.50	-58.32
	15 -- 20	-52.21	-79.32	-51.31	-67.79	-73.11
	20 -- 30	-33.99	-33.71	-38.31	-39.37	-21.62

Sur ce territoire urbain dense, l'optimisation des performances environnementales du système de TAD passe de la même manière par une augmentation de la montée en charge plus que celle de la fenêtre de temps.

Plus globalement, comme nous le présentons dans le Tableau 40, en moyenne l'impact de la montée en charge et de la fenêtre de temps sont différents selon les cas étudiés. Ainsi pour les niveaux 1 et 3, l'effet de la montée en charge est plus important, dans des mesures différentes, alors que pour le second niveau, la fenêtre de temps influe plus sur la diminution des émissions des polluants par le TAD.

Tableau 40. Impacts moyens de la montée en charge et de la fenêtre de temps sur le gain des émissions de polluants cas d'étude bretons

	Effet moyen de la montée en charge (%)	Effet moyen de la fenêtre de temps (%)
Niv1	-18.02	-6.96
Niv2	-12.16	-25.68
Niv3	-44.32	-15.00

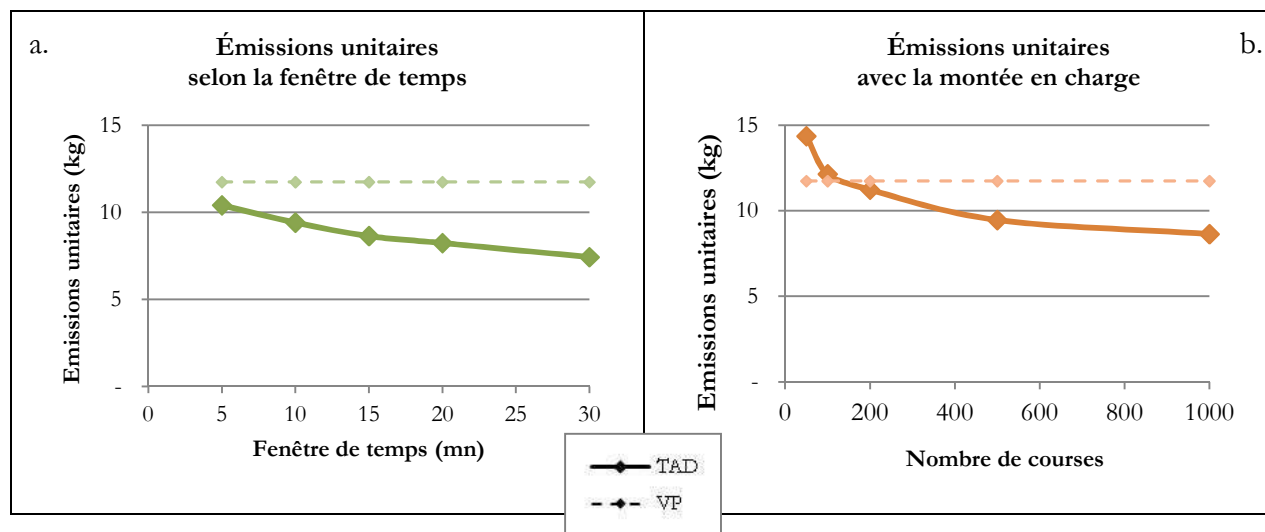
La maximisation des gains d'émissions de polluants avec un système de TAD est donc liée à la réduction du nombre de véhicules utilisés rendue possible par le regroupement des courses. Les conditions de fonctionnement des TAD, que sont la fenêtre de temps et le nombre de demandes, permettent de le favoriser de manière variable selon les configurations, en fonction du territoire. Nous avons observé que l'augmentation de la fenêtre de temps a une influence généralement plus faible que la montée en charge (le cas du niveau 2 en est un contre-exemple). Nous avons également noté des différences notables des configurations optimales pour une diminution des émissions entre les territoires. Il paraît que plus le territoire est réduit et dense, moins la fenêtre de temps nécessite d'être importante (exemple des niveaux 2 et 3). La montée en charge y a un rôle bien plus important. Ainsi, dans de tels cas, les usagers n'ont pas à accepter de sacrifier beaucoup de leur temps pour militer en faveur d'une meilleure qualité de l'air. En revanche, sur les territoires plus larges, avec une densité urbaine plus faible (espace à dominante rurale – exemple du niveau 1), la balance entre temps de transport et environnement se pose. Le regroupement des courses ne peut se faire que si les usagers autorisent au moins 20 mn de détours.

Ces résultats ne sont pas généralisables en l'état. Il faudrait multiplier les cas d'étude pour obtenir une représentativité statistique. On le constate avec la même analyse effectuée sur l'agglomération d'Avignon.

Le territoire est *a priori* similaire à celui du niveau 2 breton (agglomération de Rennes). De plus, nous observons, de la même manière que sur ce dernier cas, le TAD mis en place sur l'agglomération d'Avignon permet de réduire les émissions globales de polluants dès 100 demandes (Graphique 14.b) (à partir de ce seuil, le TAD émet moins de polluants que si les mêmes déplacements avaient été effectués avec des VP). De plus, une fenêtre de temps même minime (5 mn) permet au TAD de rivaliser en termes de pollution avec les VP (Graphique 14.a).

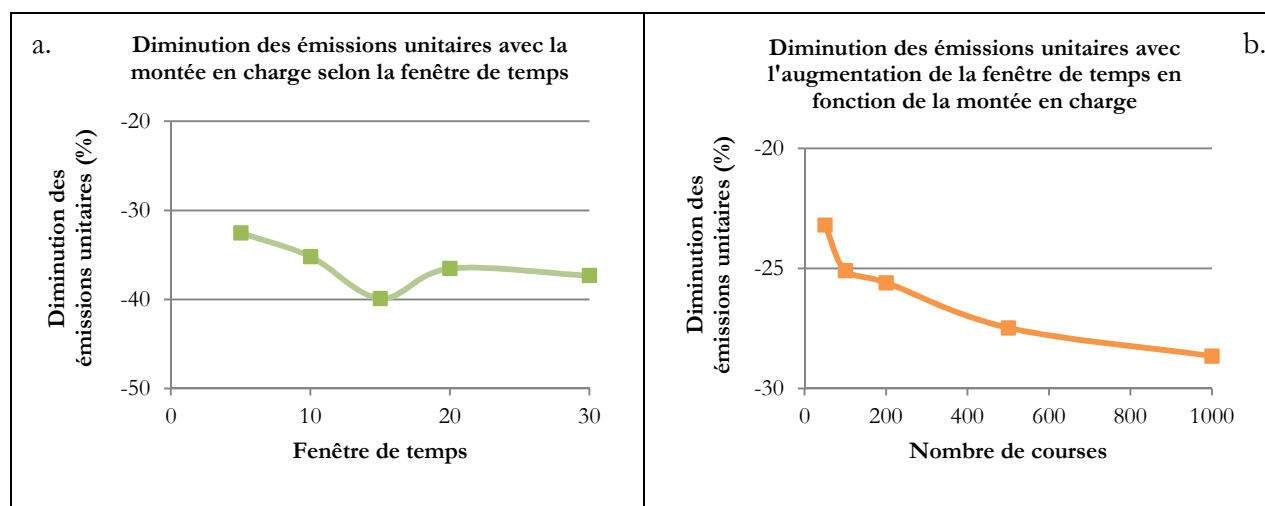
Des graphiques complémentaires à cette analyse sont disponibles dans l'Annexe 7 p. 257.

Graphique 14. Impact de la fenêtre de temps (a) et de la montée en charge (b) sur les émissions unitaires – réseau d'Avignon



De plus, comme on peut le constater sur les Graphique 15.a et b, de manière similaire aux trois niveaux d'analyse bretons, la diminution la plus importante des émissions de polluants se situe pour une fenêtre de temps de 15 mn (valeur optimale) et pour un nombre de courses supérieur à 200.

Graphique 15. Diminution des émissions unitaires selon la fenêtre de temps (a) et en fonction de la montée en charge (b)



En revanche, si ces analyses présentent de fortes similitudes entre l'agglomération d'Avignon et celle de Rennes, la comparaison des configurations optimales de chaque cas permet de déceler une différence majeure : l'effet de la montée en charge prime sur celle de la fenêtre de temps dans le cas d'Avignon (l'inverse pour Rennes) (Tableau 41). Cela est sans doute dû à la meilleure efficacité des plus courts chemins sur le réseau de Rennes, qui fait que l'on parcourt plus rapidement la même

distance. Ainsi, en 1 minute, sur ce réseau, on parcourt plus de distance que sur celui d'Avignon. On peut ainsi regrouper plus de clients dans la même durée.

Tableau 41. Impacts moyens de la montée en charge et de la fenêtre de temps sur le gain des émissions de polluants agglomération de Rennes ; agglomération d'Avignon

	Effet moyen de la montée en charge	Effet moyen de la fenêtre de temps
Rennes	-12.16	-25.68
Avignon	-23.11	-11.72

Ainsi, la configuration optimale d'un service de TAD pour la diminution des émissions sur l'agglomération d'Avignon se situe entre 15 et 20 minutes, pour 200 à 500 demandes (entre 5 et 10 minutes de fenêtre de temps et un minimum de 500 demandes pour l'agglomération de Rennes).

Tableau 42. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps – Niveau 3 valeurs en %

		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	-16.14	-29.91	-30.91	-20.94	-20.69
		-11.77	-25.87	-16.85	-20.67	-19.20
	10 -- 15	-19.30	-9.94	-15.05	-16.04	-20.51
		-1.58	-2.45	-6.42	-8.36	-12.35
	15 -- 20	-32.04	-36.59	-39.47	-49.30	-37.55
		-12.91	-5.81	-6.50	-12.42	-6.19
	20 -- 30	-13.63	-12.10	-17.39	-7.98	-16.65
		-13.02	-12.83	-16.16	-8.32	-14.72

Tableau 43. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 3 valeurs en %

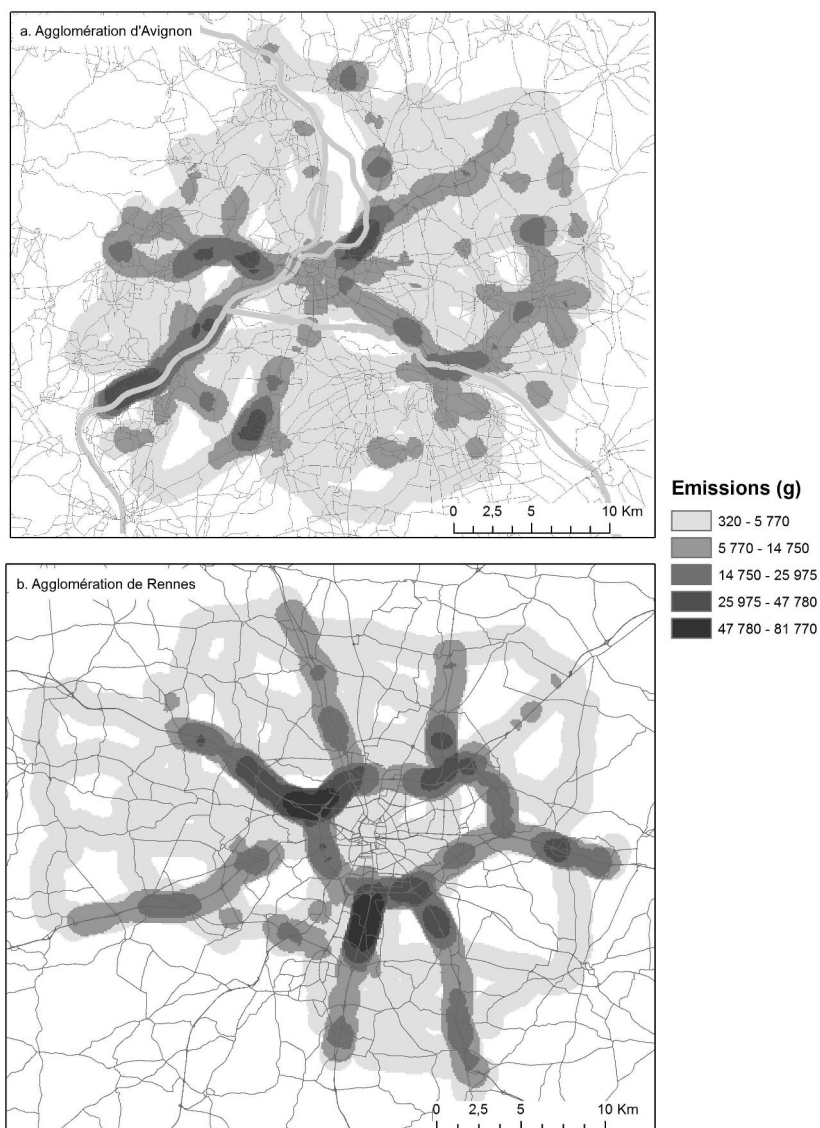
		Montée en charge				
		50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000
Fenêtre de temps (mn)	5 -- 10	-27.91	-55.79	-47.76	-41.61	-39.89
	10 -- 15	-20.88	-12.39	-21.47	-24.40	-32.85
	15 -- 20	-44.95	-42.40	-45.97	-61.72	-43.74
	20 -- 30	-26.65	-24.93	-33.55	-16.30	-31.37

Dans le cas d'Avignon, la question du compromis entre qualité de service client et qualité de l'air se pose. Est-ce que les potentiels usagers accepteraient d'autoriser 20 mn de plus pour leurs déplacements ? Comme nous l'avons signalé plusieurs fois, seuls quelques trajets se voient majorés de 20 mn. En moyenne, pour une fenêtre de temps permise de 20 minutes, seul un peu plus de

3 minutes supplémentaires par trajet sont observées. La question est alors de savoir si les usagers oseraient prendre le risque de « perdre » jusqu'à 20 minutes.

En observant la distribution des émissions sur les réseaux des deux agglomérations (Carte 6), on remarque une plus grande tendance à provoquer des « poches » d'émissions sur le réseau de l'agglomération d'Avignon. Sur le réseau de l'agglomération de Rennes, par contre, les émissions sont plus réparties le long des voies principales. On y note ainsi une plus forte concentration des émissions de polluants. Ce constat est probablement lié à une intermédierité plus concentrée sur le réseau de Rennes.

Carte 6. Localisation des émissions de polluants selon l'agglomération : Avignon (a.) ; Rennes (b.)



Quel que soit le réseau, les flux, donc les émissions, sont regroupés sur les axes principaux (les voies les plus rapides). Ainsi, la structure du réseau routier de l'agglomération de Rennes permet de canaliser les flux autour du centre de la ville (rayon de 3.5 km), alors que le réseau d'Avignon les concentre à un rayon de 700 mètres en moyenne. Comme le modèle GREEN-DRT se positionne à la sortie du pot d'échappement, il renseigne sur la localisation de la source d'émission. En revanche, il ne comporte pas de modélisation de la diffusion des polluants dans l'atmosphère. On ne peut donc ici que poser une hypothèse quant à la concentration plus importante des polluants dans l'atmosphère du centre de la ville d'Avignon que dans celui de Rennes. Cela est sans compter l'effet des vents dominants (le mistral, à Avignon par exemple) sur la diffusion des polluants.

L'ajustement des fenêtres de temps et du nombre de courses minimal effectué permet d'optimiser un service de TAD polarisé dans des proportions acceptables par les clients, avec des durées de détours supportables (quelques minutes). Globalement, des conditions de fonctionnement d'un TAD avec peu de demandes et des fenêtres de temps réduites ne sont pas idéales pour obtenir une réduction globale des émissions de polluants sur un territoire. De plus, pour qu'un TAD mis en place sur un vaste territoire soit performant d'un point de vue environnemental, il est nécessaire qu'un grand nombre de personnes l'utilisent quotidiennement et qu'ils acceptent de sacrifier au moins 20 mn pour effectuer les détours nécessaires au regroupement.

L'optimisation d'un service de TAD, de manière à en réduire les émissions de polluants, dépend directement du territoire et du réseau routier sur lequel il est mis en œuvre. Une étude au cas par cas s'impose.

b. D'autres répartitions de demandes, d'autres conclusions

Pour compléter l'analyse des performances environnementales des TAD, nous analysons maintenant les cas de mise en place de TAD pour des flux de déplacements concentrés spatialement et temporellement, puis, à l'inverse, pour des flux de déplacements très variés, toutes directions.

- Exemple de TAD mis en place en réponse à des demandes de déplacements concentrés

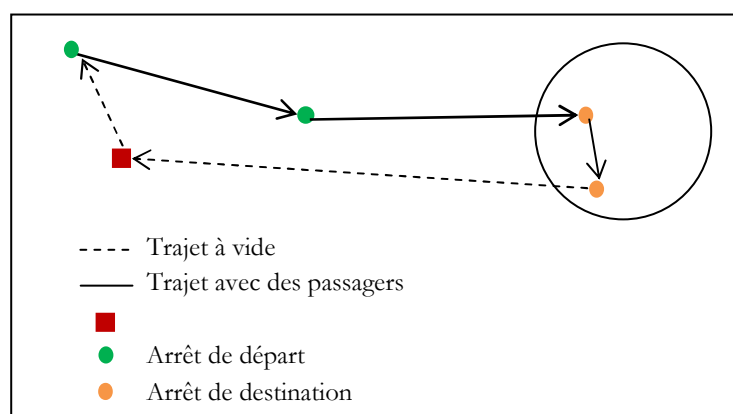
Sur un territoire polarisé à l'extrême, avec des zones résidentielles et des zones d'emploi bien différenciées spatialement, les demandes de déplacements en TAD sont toutes similaires, que ce soit

dans l'espace ou dans le temps. C'est le cas observé dans l'agglomération d'Avignon, où la grande majorité des emplois est concentrée en une petite dizaine de zones. Nous modélisons ainsi des déplacements entre des arrêts localisés sur le territoire d'Avignon comme utilisé précédemment (voir p. 191), avec une concentration d'arrêts au centre.

Ces déplacements représentent des flux domicile-travail, concentrés le matin et le soir. Il n'y a pas de déplacements au cours de la journée. Cela correspond à la mise en place d'un Plan de Déplacements Inter-Entreprise (PDIE) basé sur un TAD dédié (les véhicules ne sont utilisés que pour ce service).

Les seules destinations possibles dans ce scénario sont les arrêts situés dans le centre, alors que tous les arrêts sont des départs potentiels. Dans ce contexte, le regroupement des voyageurs pour aller vers le centre est possible mais l'enchaînement de tournées par un véhicule devient très compliqué. De plus, il n'y a aucune demande qui « sort » du centre pour aller vers la périphérie donc le véhicule rentre à vide au dépôt alors que l'usage des véhicules personnels se limite à un aller et la voiture est stationnée (Figure 43). Dans ce cas de figure, l'absence de retours grève l'efficacité du TAD.

Figure 43. Modélisation du parcours d'un véhicule du service TAD pour une demande très concentrée

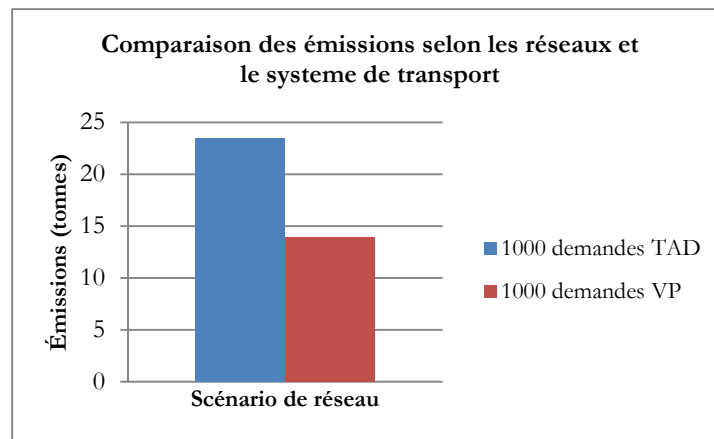


On remarque rapidement que dans ces conditions, le TAD n'est pas idéal du point de vue de l'environnement. On se rend compte que les émissions produites par les TAD sont en quantité largement supérieures à celles des VP (Graphique 16). Ce constat peut paraître surprenant de prime abord mais si on reconsidère le fonctionnement d'un service de TAD et qu'on le remet dans le contexte de ces simulations, on se rend vite compte que cela tient des distances parcourues par les véhicules.

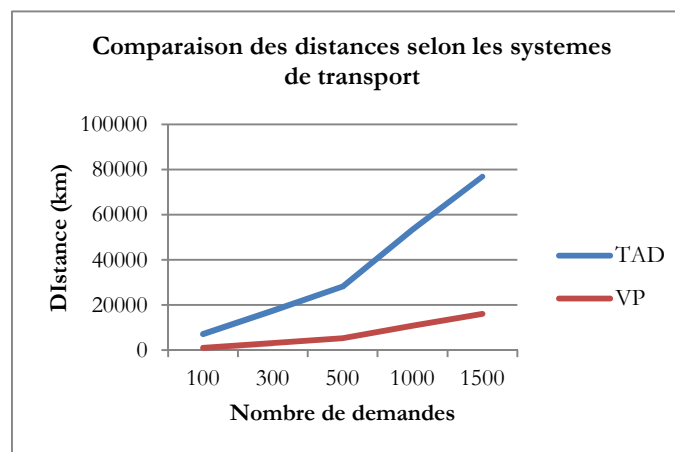
Effectivement, en comparant les distances parcourues avec l'utilisation de chacun (Graphique 17), on remarque que l'utilisation des TAD implique des distances parcourues nettement plus importantes

que lors de l'usage des VP. Cela est dû aux distances d'approches, parcourues par le véhicule TAD entre le dépôt et l'arrêt de départ de la première course et entre le dernier arrêt et le dépôt (symbolisé en tiretés dans la Figure 43).

Graphique 16. Comparaison des quantités de polluants émises selon le mode de transport
(Avignon, 1 000 demandes, fenêtre de temps = 15 mn)



Graphique 17. Comparaison des distances parcourues pour une même demande de déplacements selon le mode de transport

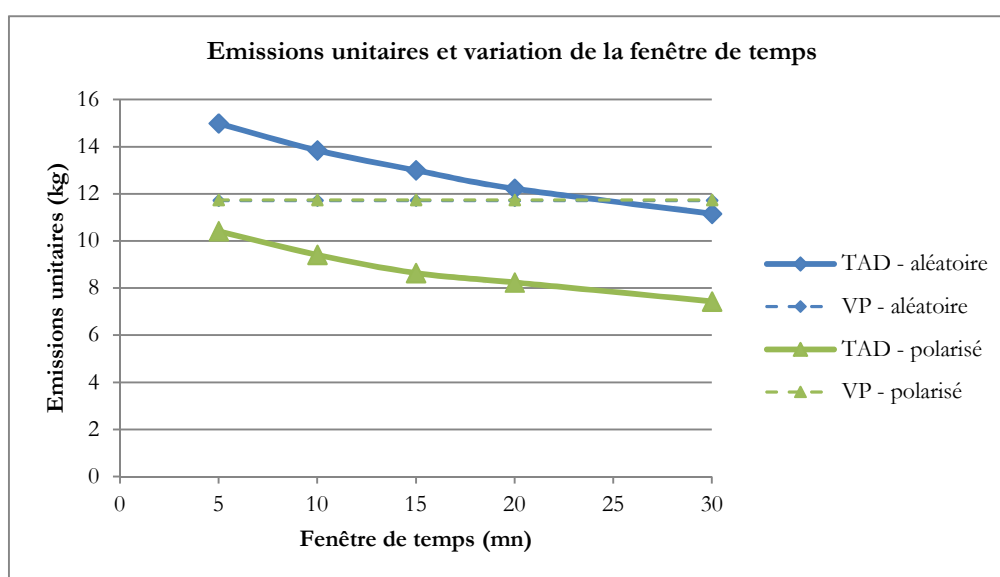


Ces résultats sont directement liés aux paramètres de simulation extrêmes qui nous avons appliqué ici mais sont représentatifs de TAD mis en place en réponse à des déplacements concentrés dans le temps et dans l'espace. Cette forme de demande n'est pas très compatible avec le fonctionnement des TAD dans lequel le taxi est exclusivement dédié au service de TAD et rentre systématiquement au dépôt au-delà d'une durée limitée d'attente (quelques minutes) entre deux courses.

- Exemple de TAD déployé sur un territoire non-polarisé (toutes directions)

Nous analysons désormais le cas d'un TAD mis en œuvre pour répondre à des demandes de déplacements très variées. Pour cela, nous avons modélisé des demandes sur le réseau de l'agglomération d'Avignon entre toujours 59 arrêts, mais ceux-ci sont localisés de manière aléatoire sur le territoire (pour rappel, dans les autres scénarios sur Avignon, les arrêts sont concentrés vers le centre de la ville). En comparant les émissions inhérentes à chaque scénario d'arrêts, on remarque rapidement que les quantités d'émissions produites par l'usage des VP sont pratiquement identiques (11,72 kg dans le cas aléatoire et 11,74 dans le cas polarisé). Par contre, les émissions unitaires produites par le fonctionnement des TAD, bien qu'elles réagissent de la même manière à l'augmentation de la fenêtre de temps, sont inférieures dans le cas polarisé. Ainsi, comme nous l'avons déjà identifié précédemment, la simple mise en œuvre du TAD permet de réduire les émissions par rapport à l'usage de VP (fenêtre de temps nécessaire inférieure à 5 mn) dans le cas polarisé, alors que dans le cas « aléatoire » il est nécessaire que la fenêtre de temps soit au minimum de 25 mn.

Graphique 18. Émissions unitaires selon la fenêtre de temps sur un territoire non-polarisé (Avignon, arrêts aléatoires, effectifs = 1 000)



Nous constatons ainsi que plus la demande est variée dans le temps et dans l'espace sur un même territoire, moins le TAD est pertinent pour une réduction globale des émissions de polluants. Plus globalement, avec les deux derniers exemples, nous remarquons que plus la demande tend vers des extrêmes de concentration spatiale et temporelle, que ce soient des demandes très similaires ou très

variées, plus les configurations du service de TAD nécessaires pour minimiser les émissions de polluants sont exigeantes. Ainsi, plus le TAD est flexible dans son fonctionnement (type point à point), plus le temps de détour nécessaire pour une réduction globale des émissions est important.

En France, la majorité des TAD sont mis en œuvre dans des territoires ruraux, peu denses. Si d'un point de vue social leur présence est souvent justifiée (désenclavement de certaines populations), d'un point de vue environnemental, il n'est pas forcément idéal. Des études très précises sont à mener pour établir les seuils minimaux de fonctionnement pour limiter les impacts environnementaux du système. Nous avons vu que pour concurrencer l'usage des VP du point de vue des émissions de polluants, la taille du territoire de déploiement du TAD a une grande importance. En effet, il est ressorti des différentes analyses que sur un territoire vaste et peu dense (type échelle régionale), les caractéristiques du TAD doivent être plus exigeantes en nombre d'utilisateurs et en flexibilité temporelle de la part des clients pour permettre une réduction globale des émissions de polluants.

Il semble ainsi qu'un système de TAD en rabattement mis en place sur un territoire urbain et/ou périurbain est plus adapté pour concurrencer l'usage des véhicules personnels, en proposant un service flexible peu exigeant en temps supplémentaire client (≈ 10 mn), tout en permettant une réduction des émissions globales d'émissions de polluants.

Conclusion générale

Les analyses présentées tout au long de ce travail avaient pour objectif d'identifier les caractéristiques des Transports À la Demande (TAD) favorables à une réduction globale des émissions de polluants.

À ce titre, nous avons développé l'outil « GREEN-DRT » à l'échelle du tronçon de route. Il permet de se dégager des évidences (le regroupement et le déclenchement du service « à la demande » permettent de réduire les émissions de polluants) et d'analyser l'impact des différentes composantes du service de TAD sur les émissions de polluants qu'il provoque. Nous sommes ainsi en capacité d'identifier des configurations de service optimales.

Nous avons également pu localiser la source des émissions sur les réseaux routiers et identifier la propension de certains réseaux à la création de poches d'émissions. Cette cartographie des émissions à l'échelle des tronçons de route est importante car elle permet l'analyse de leur distribution sur le territoire. En effet, entre deux topologies différentes, il est possible d'observer la même quantité globale d'émissions mais une répartition très différente dans l'espace. On peut envisager qu'en analysant la localisation des sources des émissions dans son contexte géographique, il soit possible d'identifier des enjeux majeurs de santé publique (par exemple, une concentration de production d'émissions à proximité de publics sensibles, aux abords d'une école). Cette approche permettrait donc, d'une part, de diagnostiquer des problèmes, et, d'autre part, en effectuant des simulations, d'identifier des solutions.

Avec cet outil, nous avons pu analyser les impacts des différentes composantes des services de TAD sur leur production de polluants atmosphériques. Les centaines de simulations effectuées nous ont permis de déterminer l'importance de chaque paramètre que l'on peut utiliser pour réduire, ou du moins minimiser, les émissions de polluants par les TAD. Ces leviers se situent à deux niveaux :

- des paramètres communs aux différents services de transport sur un même territoire liés aux caractéristiques du réseau routier ;
- des caractéristiques propres au service de TAD (nombre de demandes et fenêtre de temps).

Les recommandations concernant les réseaux pour une réduction des émissions de polluants sont donc applicables tant pour les TAD que pour l'usage des véhicules personnels. Le réseau routier en lui-même peut donc permettre, d'une part, de limiter les émissions de polluants et, d'autre part, un meilleur taux de regroupement dans les TAD. Le réseau doit alors être considéré comme une composante du service de TAD, et être analysé particulièrement en amont de leur mise en place.

Cette recommandation peut être généralisée pour toute mise en place de politique de transports avec un objectif environnemental fort, quel que soit le territoire.

L'optimisation environnementale des TAD dépend conjointement des particularités du territoire et du service envisagé. Ainsi, selon les caractéristiques du territoire et du réseau routier, les seuils d'efficacité environnementale des TAD sont différents. Cela sous-tend que le TAD ne permet pas de réduire les émissions de polluants globales par rapport à l'usage des véhicules personnels sur tous les territoires. On ne peut donc pas s'affranchir de l'établissement d'un diagnostic environnemental précis avec GREEN-DRT, en amont de la mise en place d'un service de TAD. Les performances environnementales des TAD étant propres à chaque territoire, la généralisation des résultats obtenus ici n'est pas possible. L'identification des configurations optimales entre caractéristiques du service de TAD, configuration spatio-temporelle des demandes et réseau routier pour minimiser la pollution de l'air nécessiterait de multiplier les modélisations, sur des territoires variés.

Nous avons toutefois pu établir quelques règles générales pour la mise en œuvre d'un service de TAD respectueux de l'environnement.

Dans l'absolu, pour améliorer la qualité de l'air sur un territoire lors la mise en œuvre d'un TAD, le réseau routier doit être fortement connectif, peu hiérarchisé par des vitesses homogènes. La configuration idéale des demandes pour le regroupement des clients est un volume de demandes important et des déplacements spatialement concentrés mais répartis tout au long de la journée.

En pratique, la connectivité du réseau routier est héritée. La modification du réseau pour une amélioration de la connectivité ne peut être faite qu'à la marge (aménagement coûteux). En revanche, il est possible d'y appliquer un scénario de vitesse adapté à la minimisation des émissions de polluants, tout en maintenant une bonne efficacité des trajets.

La configuration spatio-temporelle des demandes de déplacements, et leur volume, sont des éléments sur lesquels il est possible de travailler pour améliorer les performances environnementales d'un TAD, selon des temporalités différentes. À long terme, il est possible de repenser l'espace et la localisation des zones d'habitation et des zones d'activité de manière à potentialiser les performances environnementales des TAD. À court terme, il faut envisager de mettre en place une tarification variable de manière à favoriser le regroupement des clients dans les véhicules. Cette tarification peut, en plus, permettre que le temps « perdu » par le client avec l'usage du TAD soit accepté.

Cette question, difficile, du temps supplémentaire que le client est prêt à passer dans les transports est cruciale pour la performance environnementale d'un service de TAD. Au-delà de la tarification, il est possible de réfléchir à transformer le temps « perdu » en temps « utile » en proposant des services dans les véhicules (journaux et accès internet par exemple).

Pour favoriser le report modal vers les TAD, et ainsi participer à l'amélioration de la qualité de l'air, il est nécessaire de les penser en comparaison avec d'autres modes, dont le véhicule personnel. Des mesures de limitation du stationnement, qui engendrent du temps supplémentaire et du stress pour trouver un parking, ce qui provoque des émissions de polluants supplémentaires, peuvent promouvoir l'utilisation d'un service de transport qui permet de s'affranchir de ces tracasseries.

Avec ces différentes mesures, on peut espérer observer un report modal du véhicule personnel vers un TAD performant. Progressivement, le service de TAD répondrait à des besoins de mobilité modelés pour favoriser la réduction des émissions de polluants du service.

Cette approche proactive peut permettre ainsi d'optimiser la demande de mobilité à l'offre de déplacements de manière à minimiser les émissions de pollution, tout en régulant la composante économique du service. Le nouveau moyen de transport mis en place doit absolument être pensé de manière à inciter progressivement la configuration de la demande à évoluer de manière à minimiser les externalités environnementales des déplacements. Il est tout de même indiqué de veiller à ce que cette adaptation mutuelle transport/demande ne crée pas nouvelles inégalités sociales d'accessibilité et suivre les différentes évolutions du territoire.

Le modèle d'émission GREEN développé dans ce travail, et mobilisé dans l'approche propre aux TAD (GREEN-DRT), peut être une base solide pour l'évaluation des quantités de polluants émises par un système de transport routier et la localisation de la source d'émission, mais il a des limites. Des précisions et des améliorations peuvent être apportées, d'une part, en complétant le modèle d'émission de polluants lui-même et, d'autre part, en intégrant ce modèle d'émissions dans une approche plus globale intégrant la situation de trafic en entrée du modèle et précisant, en sortie, les conditions de diffusion des polluants à partir du lieu de production des émissions. De plus, pour le moment, les simulations de déplacements sont effectuées en considérant que le trafic est fluide, sans aucun arrêt lié à la présence d'un feu tricolore ou autres « stop » et « cédez le passage ». L'apport de telles informations au modèle permettrait d'évaluer l'impact de la modification de la signalisation routière sur un territoire sur la régularité de la vitesse des plus courts chemins en temps.

Au niveau du modèle en lui-même, il est envisageable de le préciser avec l'intégration de la sinuosité des routes et de leur inclinaison. Ces deux éléments ont une influence sur le rythme de conduite et ainsi sur les émissions de polluants. De plus, il sera pertinent de confronter les estimations obtenues avec ce modèle à des données mesurées sur le terrain. Un projet de recherche, mené conjointement avec la mairie de Paris, est en cours (projet IFFAP). Des véhicules équipés de divers capteurs d'émissions, de fonctionnement du moteur, de conditions météorologiques ont été mis en circulation. Les enregistrements des données se font toutes les 3 à 5 secondes, de manière géolocalisée. Ces informations peuvent permettre de valider les estimations faites avec GREEN et de les préciser.

En couplant GREEN avec un modèle de trafic, on pourrait simuler des situations de circulation réelles. Ainsi, la prise en compte des surémissions à l'accélération dans les simulations serait plus probante selon les différents polluants. Une optimisation des flux de déplacement résultant d'un système multi-agent, ou autres modèles de trafic, pourrait être effectuée en entrée du modèle GREEN, et ainsi mettre en évidence l'impact des situations de trafic sur les émissions de polluants. Cela permettrait de modéliser, entre autres, des conditions de congestion durant lesquelles les surémissions dues aux accélérations à faible vitesse sont fréquentes.

Le modèle GREEN permet de localiser la source des émissions de polluants sur un territoire. Pour avoir une approche encore plus complète de la question de la qualité de l'air résultante de la circulation des véhicules, il serait pertinent de le coupler à un modèle de diffusion atmosphérique des différents polluants en sortie.

Une telle approche des émissions de polluants permettrait d'estimer l'impact réel des différentes mesures et politiques urbaines avant leur mise en place. Il serait également possible d'analyser l'impact d'aménagements routiers, comme les dos d'âne ou les ronds-points, sur la qualité de l'air, question de plus en plus présente dans les préoccupations des moyennes et grandes villes. Cela permettrait également d'approfondir l'analyse effectuée sur l'impact de la forme des réseaux routiers sur les distances parcourues et les émissions de polluants en l'étendant à l'impact des formes urbaines sur la qualité de l'air.

L'évaluation de l'impact de chaque paramètre de la chaîne d'émissions de polluants, des conditions de circulation des véhicules sur les émissions de polluants à la diffusion des polluants dans l'atmosphère, devrait permettre d'aider les décideurs pour prendre des mesures efficaces sur leur territoire pour en améliorer la qualité de l'air, autant dans les villes que dans les campagnes.

Annexes

Annexe 1. Calcul des émissions avec GREEN

```

;;;;;;;;;;
;; tvc-lisp, Rémi PRUD'HOMME 2011
;;;;;;;;;;

;;;;;;;;;;
on utilise les fonction génériques de Common Lisp (au travers des « methods ») pour classifier
l'accès aux polynomes de calcul des émissions. En effet le dispatcher au travers de l'objet
'vehicule' sélectionne la bonne méthode pour trouver son polynome. La fabrication des méthodes
reste manuelle, une fois contrôlées, cela ne change plus.
;;;;;;;;;;

(defclass vehicule()
  ((seat :initform 4 :initarg :seat :accessor seat))
  (:documentation "modélisation of vehicule for Green simulation"))

(defclass vehicule-diesel (vehicule)
  ()
  (:documentation ""))

(defclass vehicule-gasoline (vehicule)
  ()
  (:documentation ""))

(defclass berline-diesel (vehicule-diesel)
  ()
  (:documentation ""))

(defclass minibus-diesel (vehicule-diesel)
  ()
  (:documentation ""))

(defclass citadine-diesel (vehicule-diesel)
  ()
  (:documentation ""))

(defclass berline-gasoline ( vehicule-gasoline)
  ()
  (:documentation ""))

(defclass minibus-gasoline ( vehicule-gasoline)
  ()
  (:documentation ""))

(defclass citadine-gasoline (vehicule-gasoline)
  ()
  (:documentation ""))

;;;;;;;;;;
;; construction des objets
;;;;;;;;;;

(defun build-vehicule (vehicule-type carburant &key seat)
  (cond
    ((string= "diesel" carburant)
     (cond
       ((string= "berline" vehicule-type) (make-instance 'berline-diesel :seat seat))
       ((string= "citadine" vehicule-type) (make-instance 'citadine-diesel :seat seat))
       ((string= "minibus" vehicule-type) (make-instance 'minibus-diesel :seat seat))
       (t (print "erreur de vehicule"))))

    ((string= "gasoline" carburant)
     (cond
       ((string= "berline" vehicule-type) (make-instance 'berline-gasoline :seat seat))
       ((string= "citadine" vehicule-type) (make-instance 'citadine-gasoline :seat seat))
       ((string= "minibus" vehicule-type) (make-instance 'minibus-gasoline :seat seat))
       (t (print "Erreur de vehicule"))))
    (t (print "erreur de carburant"))))

;;;;;;;;;;

```

```
(defmethod emission-co ((auto berline-diesel) speed)
  (diesel-co speed))

(defmethod emission-nox ((auto berline-diesel) speed)
  (|poly-diesel-berline-nox| speed))

(defmethod emission-co2 ((auto berline-diesel) speed)
  (|poly-diesel-berline-co2| speed))

(defmethod emission-pm ((auto berline-diesel) speed)
  (|poly-diesel-berline-pm| speed))

(defmethod emission-voc ((auto berline-diesel) speed)
  (|poly-diesel-berline-voc| speed))

;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;

(defmethod emission-co ((auto minibus-diesel) speed)
  (diesel-co speed))

(defmethod emission-nox ((auto minibus-diesel) speed)
  (|poly-diesel-minibus-nox| speed))

(defmethod emission-co2 ((auto minibus-diesel) speed)
  (|poly-diesel-minibus-co2| speed))

(defmethod emission-pm ((auto minibus-diesel) speed)
  (|poly-diesel-minibus-pm| speed))

(defmethod emission-voc ((auto minibus-diesel) speed)
  (|poly-diesel-minibus-voc| speed))

;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;

(defmethod emission-co ((auto citadine-diesel) speed)
  (diesel-co speed))

(defmethod emission-nox ((auto citadine-diesel) speed)
  (|poly-diesel-citadine-nox| speed))

(defmethod emission-co2 ((auto citadine-diesel) speed)
  (|poly-diesel-citadine-co2| speed))

(defmethod emission-pm ((auto citadine-diesel) speed)
  (|poly-diesel-citadine-pm| speed))

(defmethod emission-voc ((auto citadine-diesel) speed)
  (|poly-diesel-citadine-voc| speed))

;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;

(defmethod emission-co ((auto berline-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-berline-co| speed))

(defmethod emission-nox ((auto berline-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-berline-nox| speed))

(defmethod emission-co2 ((auto berline-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-berline-co2| speed))

(defmethod emission-pm ((auto berline-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-berline-pm| speed))

(defmethod emission-voc ((auto berline-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-berline-voc| speed))

;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;
```



```

(defmethod emission-co ((auto minibus-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-minibus-co| speed))

(defmethod emission-nox ((auto minibus-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-minibus-nox| speed))

(defmethod emission-co2 ((auto minibus-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-minibus-co2| speed))

(defmethod emission-pm ((auto minibus-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-minibus-pm| speed))

(defmethod emission-voc ((auto minibus-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-minibus-voc| speed))

;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;

(defmethod emission-co ((auto citadine-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-citadine-co| speed))

(defmethod emission-nox ((auto citadine-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-citadine-nox| speed))

(defmethod emission-co2 ((auto citadine-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-citadine-co2| speed))

(defmethod emission-pm ((auto citadine-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-citadine-pm| speed))

(defmethod emission-voc ((auto citadine-gasoline) speed)
  (|poly-gasoline-citadine-voc| speed))

;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;; correction des émissions à froid
;;;;;;;;;;;;

; omega
(defmethod correction-omega-co ((auto vehicule-diesel))
  (|poly-omega-diesel-co| 1))

(defmethod correction-omega-nox ((auto vehicule-diesel))
  (|poly-omega-diesel-nox| 1))

(defmethod correction-omega-co2 ((auto vehicule-diesel))
  (|poly-omega-diesel-co2| 1))

(defmethod correction-omega-hc ((auto vehicule-diesel))
  (|poly-omega-diesel-hc| 1))

(defmethod correction-omega-co ((auto vehicule-gasoline))
  (|poly-omega-gasoline-co| 1))

(defmethod correction-omega-nox ((auto vehicule-gasoline))
  (|poly-omega-gasoline-nox| 1))

(defmethod correction-omega-co2 ((auto vehicule-gasoline))
  (|poly-omega-gasoline-co2| 1))

(defmethod correction-omega-fc ((auto vehicule-gasoline))
  (|poly-omega-gasoline-fc| 1))

(defmethod correction-omega-hc ((auto vehicule-gasoline))
  (|poly-omega-gasoline-hc| 1))

;; f(V)

(defmethod correction-speed-co ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-speed-gasoline-co| speed))

(defmethod correction-speed-nox ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-speed-gasoline-nox| speed))

(defmethod correction-speed-co2 ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-speed-gasoline-co2| speed))

```

```
(defmethod correction-speed-hc ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-speed-gasoline-hc| speed))

(defmethod correction-speed-fc ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-speed-gasoline-fc| speed))

(defmethod correction-speed-co ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-speed-diesel-co| speed))

(defmethod correction-speed-nox ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-speed-diesel-nox| speed))

(defmethod correction-speed-co2 ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-speed-diesel-co2| speed))

(defmethod correction-speed-hc ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-speed-diesel-hc| speed))

;;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;; g(t)
;;;;;;;;;;;;;

(defmethod correction-temperature-co ((auto vehicule-gasoline) temperature)
  (|poly-temperature-gasoline-co| temperature))

(defmethod correction-temperature-nox ((auto vehicule-gasoline) temperature)
  (|poly-temperature-gasoline-nox| temperature))

(defmethod correction-temperature-co2 ((auto vehicule-gasoline) temperature)
  (|poly-temperature-gasoline-co2| temperature))

(defmethod correction-temperature-hc ((auto vehicule-gasoline) temperature)
  (|poly-temperature-gasoline-hc| temperature))

(defmethod correction-temperature-fc ((auto vehicule-gasoline) temperature)
  (|poly-temperature-gasoline-fc| temperature))

(defmethod correction-temperature-co ((auto vehicule-diesel) temperature)
  (|poly-temperature-diesel-co| temperature))

(defmethod correction-temperature-nox ((auto vehicule-diesel) temperature)
  (|poly-temperature-diesel-nox| temperature))

(defmethod correction-temperature-co2 ((auto vehicule-diesel) temperature)
  (|poly-temperature-diesel-co2| temperature))

(defmethod correction-temperature-hc ((auto vehicule-diesel) temperature)
  (|poly-temperature-diesel-hc| temperature))

(defmethod correction-temperature-fc ((auto vehicule-diesel) temperature)
  (|poly-temperature-diesel-fc| temperature))

;;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;; correction de la distance
;;;;;;;;;;;;;

(defmethod correction-distance-co ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-correction-distance-diesel-co| speed))

(defmethod correction-distance-nox ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-correction-distance-diesel-nox| speed))

(defmethod correction-distance-co2 ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-correction-distance-diesel-co2| speed))

(defmethod correction-distance-hc ((auto vehicule-diesel) speed)
  (|poly-correction-distance-diesel-hc| speed))

(defmethod correction-distance-co ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-correction-distance-gasoline-co| speed))
```

```

(defmethod correction-distance-nox ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-correction-distance-gasoline-nox| speed))

(defmethod correction-distance-co2 ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-correction-distance-gasoline-co2| speed))

(defmethod correction-distance-fc ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-correction-distance-gasoline-fc| speed))

(defmethod correction-distance-hc ((auto vehicule-gasoline) speed)
  (|poly-correction-distance-gasoline-hc| speed))

;;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;; Surémissions accélération
;;;;;;;;;;;;;

(defmethod acceleration-co2 ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (|poly-diesel-acceleration-co2-| speed acceleration))

(defmethod acceleration-nox-fast ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (|poly-diesel-acceleration-nox-fast| speed acceleration))

(defmethod acceleration-nox-slow ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (|poly-diesel-acceleration-nox-slow| speed acceleration))

(defmethod acceleration-nox ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (if (< acceleration -0.5)
      (acceleration-nox-slow auto speed acceleration)
      (acceleration-nox-fast auto speed acceleration)))

(defmethod acceleration-voc-fast ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (|poly-diesel-acceleration-voc-fast| speed acceleration))

(defmethod acceleration-voc-slow ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (|poly-diesel-acceleration-voc-slow| speed acceleration))

(defmethod acceleration-voc ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (if (< acceleration -0.5)
      (acceleration-voc-slow auto speed acceleration)
      (acceleration-voc-fast auto speed acceleration)))

(defmethod acceleration-pm ((auto vehicule-diesel) speed acceleration)
  (|poly-diesel-acceleration-pm-| speed acceleration))

;;;;;;;;;;;;;

(defmethod acceleration-co2 ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (|poly-gasoline-acceleration-co2-| speed acceleration))

(defmethod acceleration-nox-fast ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (|poly-gasoline-acceleration-nox-fast| speed acceleration))

(defmethod acceleration-nox-slow ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (|poly-gasoline-acceleration-nox-slow| speed acceleration))

(defmethod acceleration-nox ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (if (< acceleration -0.5)
      (acceleration-nox-slow auto speed acceleration)
      (acceleration-nox-fast auto speed acceleration)))

(defmethod acceleration-voc-fast ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (|poly-gasoline-acceleration-voc-fast| speed acceleration))

(defmethod acceleration-voc-slow ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (|poly-gasoline-acceleration-voc-slow| speed acceleration))

(defmethod acceleration-voc ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (if (< acceleration -0.5)
      (acceleration-voc-slow auto speed acceleration)
      (acceleration-voc-fast auto speed acceleration)))

(defmethod acceleration-pm ((auto vehicule-gasoline) speed acceleration)
  (|poly-gasoline-acceleration-pm-| speed acceleration))

```

```

(defmethod acceleration-total ((v vehicule) speed acceleration)
  (+ (acceleration-co2 v speed acceleration)
     (if (< acceleration -0.5)
         (acceleration-nox-slow v speed acceleration)
         (acceleration-nox-fast v speed acceleration))
     (if (< acceleration -0.5)
         (acceleration-voc-slow v speed acceleration)
         (acceleration-voc-fast v speed acceleration))
     acceleration-pm v speed acceleration))

;;;;;;;;;;;;;
;;;;;;;;;;;;; Surémissions à froid
;;;;;;;;;;;;;

(defmethod over-emission-co ((v vehicule) speed temperature)
  "Compute the amount of pollution of CO during the cold starting"
  (* (+ (correction-speed-co v speed)
        (correction-temperature-co v temperature)
        -1)
     (correction-omega-co v)))

(defmethod over-emission-nox ((v vehicule) speed temperature)
  "Compute the amount of pollution of NOX during the cold starting"
  (* (+ (correction-speed-nox v speed)
        (correction-temperature-nox v temperature)
        -1)
     (correction-omega-nox v)))

(defmethod over-emission-co2 ((v vehicule) speed temperature)
  "Compute the amount of pollution of CO2 during the cold starting"
  (* (+ (correction-speed-co2 v speed)
        (correction-temperature-co2 v temperature)
        -1)
     (correction-omega-co2 v)))

(defmethod over-emission-fc ((v vehicule) speed temperature)
  "Compute the amount of pollution of FC during the cold starting"
  (* (+ (correction-speed-fc v speed)
        (correction-temperature-fc v temperature)
        -1)
     (correction-omega-fc v)))

(defmethod over-emission-hc ((v vehicule) speed temperature)
  "Compute the amount of pollution of HC during the cold starting"
  (* (+ (correction-speed-hc v speed)
        (correction-temperature-hc v temperature)
        -1)
     (correction-omega-hc v)))

(defmethod over-emission-total((v vehicule) speed temperature)
  (+ (over-emission-co v speed temperature)
     (over-emission-co2 v speed temperature)
     (over-emission-nox v speed temperature)
     (over-emission-hc v speed temperature)))

(defmethod emission-total((v vehicule) speed section-length)
  (* section-length
     (+ (emission-co v speed)
        (emission-co2 v speed)
        (emission-nox v speed)
        (emission-voc v speed)
        (emission-pm v speed))))

(defun get-vehicule (nb-seat)
  (cond
    ((>= nb-seat 5) "minibus")
    ((>= nb-seat 3) "berline")
    (t "citadine")))

(defun create-vehicule ( nb-seat &key (carburant "gasoline"))
  (build-vehicule (get-vehicule nb-seat) carburant ))

(defun set-vehicule()
  (create-vehicule (instance-get-nb-seat) :carburant "diesel"))

```

Annexe 2. Facteurs d'émission « à chaud » - COPERT IV

$$EF = (a + c \cdot V + e \cdot V^2) / (1 + b \cdot V + d \cdot V^2)$$

Carburant	Polluant (g/km)	Taille véhicule	a	b	c	d	e
Essence	CO	autres	$1.36 \cdot 10^{-1}$	$-1.41 \cdot 10^{-2}$	$-8.91 \cdot 10^{-4}$	$4.99 \cdot 10^{-5}$	0
		minibus	57.789	0	-1.5132	0.0	0.01104
	NOx	Toutes	$1.06 \cdot 10^{-1}$		$-1.58 \cdot 10^{-3}$	0	$7.10 \cdot 10^{-6}$
		minibus	1.9547	0	0.0179		
	Consommation (FC)	<1.4	$1.36 \cdot 10^2$	$2.60 \cdot 10^{-2}$	-1.65	$2.28 \cdot 10^{-4}$	$3.12 \cdot 10^{-2}$
		1.4-2.0	$1.74 \cdot 10^2$	$6.85 \cdot 10^{-2}$	$3.64 \cdot 10^{-1}$	$-2.47 \cdot 10^{-4}$	$8.74 \cdot 10^{-3}$
		>2.0	$2.85 \cdot 10^2$	$7.28 \cdot 10^{-2}$	$-1.37 \cdot 10^{-1}$	$-4.16 \cdot 10^{-4}$	0
	CO2	$44.011 \cdot FC / (12.011 + 1.008 \cdot 1.80)$					
	VOC	minibus	5.4734	0	-0.117		0.000677
	PM	toutes - GDI	0.01651				
Diesel	CO	toutes	$0.0175 + 86.42 \cdot (1 + e^{((V+117.67)/21.99)})^{-1}$				
		minibus	1.8281	0.0	-0.0256	0.0	0.0002
	NOx	toutes	"1.11"		$-2.02 \cdot 10^{-2}$		$1.48 \cdot 10^{-4}$
		minibus	5.1234	0.0	-0.1189	0.0	0.000816
	Consommation (FC)	<2.0	$1.62 \cdot 10^2$	$1.23 \cdot 10^{-1}$	2.18	$-7.76 \cdot 10^{-4}$	$-1.28 \cdot 10^{-2}$
		>2.0	$1.95 \cdot 10^2$	$7.19 \cdot 10^{-2}$	$1.87 \cdot 10^{-1}$	$-3.32 \cdot 10^{-4}$	$9.99 \cdot 10^{-3}$
	CO2	$44.011 \cdot FC / (12.011 + 1.008 \cdot 2)$					
	VOC	minibus	0.2162	0.0	-0.00284	0.0	0.0000175
		toutes	$4.50 \cdot 10^{-2}$	0.0	$-5.39 \cdot 10^{-2}$	0.0	$3.48 \cdot 10^{-6}$
	PM	minibus	0.288	0.0	0.000577	0.0	0.0000125

Annexe 3. Facteurs d'émissions à froid – MEET

$$E = \omega \times [f(V) + g(T) - 1]$$

Facteur de surémission de référence (ω)

Carburant	Polluant				
	CO ₂	CO	NO _x	HC	FC
Essence	144.16	63.51	8.23	-0.30	83.71
Diesel	182.57	2.18	0.82	0.06	62.95

Coefficient de correction par la vitesse $f(V)$

Carburant	Polluant				
	CO ₂	CO	NO _x	HC	FC
Essence	$-0.0101 V + 1.2024$	$0.0288 V + 0.4245$	$0.1136 V - 1.2727$	$0.0142 V + 0.7154$	$0.0064 V + 0.8716$
Diesel	1	$-0.0185 V + 1.3704$	$-0.0227 V + 1.4545$	$-0.0163 V + 1.3252$	1

Coefficient de correction par la température $g(T)$

Carburant	Polluant				
	CO ₂	CO	NO _x	HC	FC
Essence	1	$-0.0918 T + 2.8360$	1	$-0.1344 T + 3.6888$	$-0.0431 T + 1.8618$
Diesel	$-0.0458 T + 1.9163$	$-0.0602 T + 2.2048$	$-0.0893 T + 2.7857$	$-0.0976 T + 2.9512$	$-0.0439 T + 1.8787$

$$h(d) = (1 - e^{-a \cdot \text{delta}}) / (1 - e^{-a})$$

delta est le ratio entre la distance totale du voyage et la distance à froid (d_c)

Distance à froid selon la vitesse de circulation (d_c)

	CO ₂	CO	NO _x	HC	FC
Essence	$0.15 V + 2.68$	$0.04 V + 5.42$	$0.02 V + 2.83$	$0.09 V + 1.94$	$0.28 V + 0.47$
Diesel	$0.24 V + 0.09$	$0.08 V + 4.83$	$-0.07 V + 7.50$	$0.08 V + 4.83$	$0.13 V + 3.42$

Coefficient de correction de la distance (a)

	CO ₂	CO	NO _x	HC	FC
Essence	2.85	6.70	2.54	10.96	7.97
Diesel	3.95	3.43	0.89	2.48	11.46

Annexe 4. Facteurs de surémission à l'accélération – Int Panis *et al.*

$$En(t) = \max[E0, f1 + f2vn(t) + f3vn(t)^2 + f4an(t) + f5an(t)^2 + f6vn(t)an(t)]$$

Carburant	Conditions accélération	Polluant	E0	f1	f2	f3	f4	f5	f6
Essence	tous	CO ₂	0	0.553	0.161	-0.00289	0.266	0.511	0.183
	a >= -0.5 m/s ²	NO _x	0	0.000619	0.00008	-0.00000403	-0.000413	0.00038	0.000177
	a < -0.5 m/s ²		0	0.000217	0	0	0	0	0
	a >= -0.5 m/s ²	VOC	0	0.00447	0.000000732	-2.87E-08	-0.00000341	0.00000494	0.00000166
	a < -0.5 m/s ²		0	0.00263	0	0	0	0	0
	tous	PM	0	0	0.0000157	-0.000000921	0	0.0000375	0.0000189
Diesel	tous	CO ₂	0	0.324	0.0859	0.00496	-0.0586	0.448	0.23
	a >= -0.5 m/s ²	NO _x	0	0.00241	-0.000411	0.0000673	-0.00307	0.00214	0.0015
	a < -0.5 m/s ²		0	0.00168	-0.0000662	0.000009	0.00025	0.000291	0.00012
	a >= -0.5 m/s ²	VOC	0	0.0000922	0.00000909	-0.000000229	-0.000022	0.0000169	0.00000375
	a < -0.5 m/s ²		0	0.0000525	0.00000722	-0.000000187	0	-0.0000102	0.00000422
	tous	PM	0	0	0.000313	-0.0000184	0	0.00075	0.000378

Annexe 5. Dessin des tournées avec ArcGIS

```
# Import arcpy module
import arcpy

# Check out any necessary licenses
arcpy.CheckOutExtension("Network")

# Load required toolboxes
arcpy.ImportToolbox("Model Functions")

# Local variables:
Simu_Essonne_mdb = "C:\\GREEN-Geo\\GREEN\\Simulations\\Essonne\\Simu_Essonne.mdb"
reseau_routier_ND2_nd = "E:\\GREEN-GEO\\Essonne\\reseau_routier_ND2.nd"
Route__4_ = "Route"
Route__2_ = "Route"
v_name__FdR_txt =
"C:\\GREEN-Geo\\GREEN\\Calcul_des_émissions\\data\\resultat\\%Name%_FdR.txt"
simu_1003_T_0 =
"C:\\GREEN-Geo\\GREEN\\Simulations\\Essonne\\Simu_Essonne.mdb\\simu_1003_T_0"
simu_1003_T_0_Layer = "simu_1003_T_0_Layer"
Route = "Route"

# Process: Générer une couche d'itinéraires
arcpy.MakeRouteLayer_na(reseau_routier_ND2_nd, "Route", "Temps_mn", "USE_INPUT_ORDER",
"PRESERVE_BOTH", "NO_TIMEWINDOWS", "", "ALLOW_UTURNS", "", "NO_HIERARCHY", "",
"TRUE_LINES_WITH_MEASURES", "")

# Process: Iterate Tables
arcpy.IterateTables_mb(Simu_Essonne_mdb, "simu_10*", "", "NOT_RECURSIVE")

# Process: Make XY Event Layer
arcpy.MakeXYEventLayer_management(simu_1003_T_0, "x_coord", "y_coord", simu_1003_T_0_Layer,
"PROJCS['MI_0',GEOGCS['GCS_North_American_1983',DATUM['D_North_American_1983',SPHEROID['Geodetic
_Reference_System_of_1980',6378137.0,298.2572221009113]],PRIMEM['Greenwich',0.0],UNIT['Degree',0.
0174532925199433]],PROJECTION['Lambert_Conformal_Conic'],PARAMETER['false_easting',700000.0],PARA
METER['false_northing',6600000.0],PARAMETER['central_meridian',3.0],PARAMETER['standard_parallel_
1',44.0],PARAMETER['standard_parallel_2',49.00000000001],PARAMETER['latitude_of_origin',46.5],UNI
T['Meter',1.0]];-35597500 -23641900 124074650,523328 ;-100000 10000 ;-100000
10000 ;0,001 ;0,001 ;0,001 ;IsHighPrecision", "")

# Process: Add Locations
arcpy.AddLocations_na(Route, "Stops", simu_1003_T_0_Layer, "Name IDarret #;RouteName Relation
#;TimeWindowStart # #;TimeWindowEnd # #;CurbApproach # 0 ;Attr_Temps (mn) # 0 ;Attr_Distance (km)
# 0", "5000 Meters", "", "reseau_routier_Project SHAPE ;reseau_routier_ND2_Junctions NONE",
"MATCH_TO_CLOSEST", "APPEND", "NO_SNAP", "5 Meters", "INCLUDE", "reseau_routier_Project
#;reseau_routier_ND2_Junctions #")

# Process: Rechercher
arcpy.Solve_na(Route__4_, "HALT", "TERMINATE")

# Process: Directions
arcpy.Directions_na(Route__2_, "TEXT", v_name__FdR_txt, "Kilometers", "REPORT_TIME", "")
```


Annexe 6. Résultats simulations Bretagne

		FdT (mn)	Effectifs	Emissions (tonnes)	E. unitaire (kg/pers)	Distance (km)	Distance moyenne tournée (km)	Nb- tournees	Densité de remplissage	Taux de regroupement	Vitesse moyenne (km/h)	VPK	Temps- TAD	Temps- VP	Tps supplémentaire TAD (mn)	Tps supp course (mn)	% tps supp	E/km (g)	E/veh (g)
TAD Niv 1	Niv 1 - 5 mn	5	50	3.24	64.82	13285	403	33	0.65	1.52	90.17	0.0060	3405.9	3405.9	0.02	0.00	0.00	244	98 211
		5	100	6.59	65.95	27440	538	51	0.57	1.96	91.72	0.0058	7342.1	7342.1	0.04	0.00	0.00	240	129 310
		5	200	11.33	56.64	47539	651	73	0.65	2.74	90.76	0.0068	13628.9	13620.1	8.86	0.04	0.07	238	155 180
		5	500	27.64	55.28	116385	808	144	0.67	3.47	91.55	0.0069	35961.4	35919.5	41.90	0.08	0.12	238	191 959
		5	1000	49.81	49.81	209988	913	230	0.73	4.35	91.17	0.0077	71335.8	71270.3	65.48	0.07	0.09	237	216 567
	Niv 1 - 10 mn	10	50	3.16	63.24	12909	403	32	0.56	1.56	89.04	0.0063	3663.2	3657.3	5.93	0.12	0.16	245	98 805
		10	100	6.28	62.75	26117	522	50	0.67	2.00	90.76	0.0062	7040.1	7020.2	19.91	0.20	0.28	240	125 502
		10	200	11.83	59.16	49630	628	79	0.66	2.53	90.94	0.0065	14749.5	14706.5	43.03	0.22	0.29	238	149 772
		10	500	27.21	54.43	114700	825	139	0.72	3.60	91.64	0.0071	37261.0	37095.2	165.83	0.33	0.45	237	195 787
		10	1000	45.69	45.69	192712	931	207	0.79	4.83	90.27	0.0084	70666.6	70053.7	612.81	0.61	0.87	237	220 744
	Niv 1 - 15 mn	15	50	3.32	66.39	13597	439	31	0.64	1.61	89.64	0.0058	3859.3	3821.6	37.73	0.75	0.99	244	107 087
		15	100	6.05	60.48	25258	616	41	0.70	2.44	91.18	0.0064	7529.8	7431.4	98.35	0.98	1.32	239	147 505
		15	200	11.45	57.27	48132	729	66	0.69	3.03	91.52	0.0067	15193.2	14937.0	256.25	1.28	1.72	238	173 560
		15	500	25.09	50.17	106161	907	117	0.76	4.27	90.67	0.0076	36774.5	36249.4	525.09	1.05	1.45	236	214 420
		15	1000	44.76	44.76	189361	1070	177	0.87	5.65	90.74	0.0085	73466.4	72001.6	1464.74	1.46	2.03	236	252 906
	Niv 1 - 20 mn	20	50	3.13	62.69	12984	499	26	0.59	1.92	91.32	0.0062	3449.3	3388.4	60.97	1.22	1.80	241	120 552
		20	100	5.34	53.35	22214	617	36	0.71	2.78	90.79	0.0073	7059.5	6898.0	161.52	1.62	2.34	240	148 207
		20	200	10.26	51.31	43140	744	58	0.79	3.45	90.33	0.0075	15077.8	14798.7	279.07	1.40	1.89	238	176 935
		20	500	23.98	47.95	101109	887	114	0.86	4.39	90.85	0.0080	37591.8	36601.4	990.40	1.98	2.71	237	210 309
		20	1000	40.31	40.31	169929	1036	164	0.95	6.10	90.27	0.0095	70960.5	68594.6	2365.89	2.37	3.45	237	245 808
	Niv 1 - 30 mn	30	50	2.87	57.32	11792	454	26	0.67	1.92	90.14	0.0068	3568.1	3497.2	70.93	1.42	2.03	243	110 232
		30	100	5.17	51.75	21466	631	34	0.73	2.94	90.97	0.0074	7417.1	7099.0	318.13	3.18	4.48	241	152 195
		30	200	9.88	49.39	41566	756	55	0.81	3.64	90.69	0.0077	15206.2	14604.9	601.29	3.01	4.12	238	179 596
		30	500	21.96	43.92	92424	983	94	0.86	5.32	90.52	0.0086	38384.3	36495.2	1889.09	3.78	5.18	238	233 641
		30	1000	39.09	39.09	164513	1035	159	1.11	6.29	90.30	0.0098	77309.4	73074.9	4234.52	4.23	5.79	238	245 880

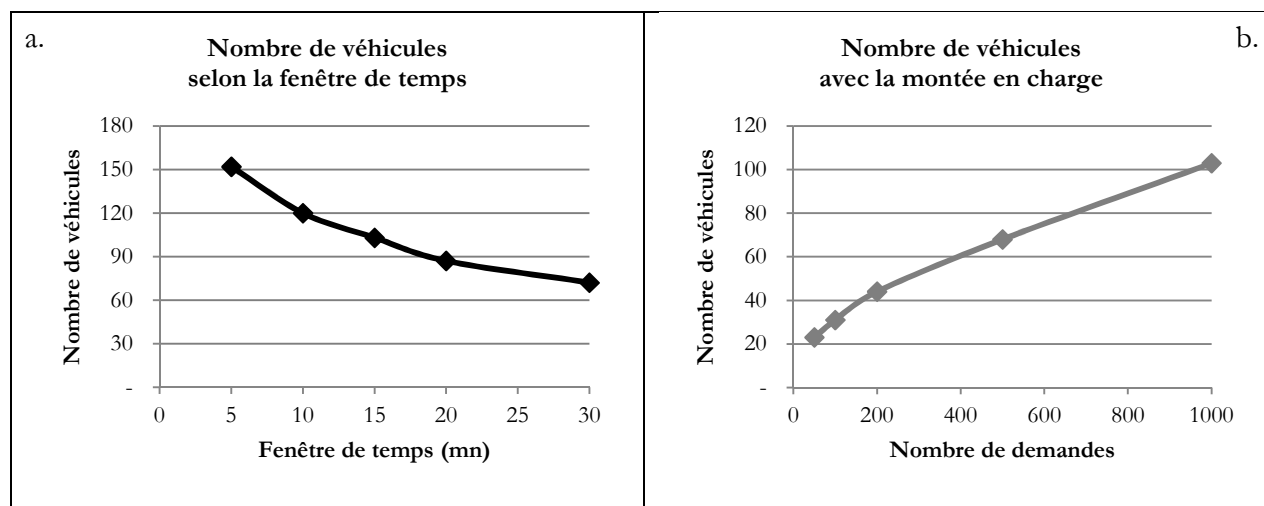
		FdT (mn)	Effectifs	Émissions (tonnes)	E unitaire (kg/pers)	Distance (km)	Distance moyenne tournée (km)	Nb- tournees	Densité de remplissage	Taux de regroupement	Vitesse moyenne (km/h)	VPK	Temps- TAD	Temps- VP	Tps supplémentaire TAD (mn)	Tps supp course (mn)	% tps supp	E/km (g)	E/veh (g)
TAD Niv 2	Niv 2 - 5 mn	5	50	0.88	17.61	2142	93	23	0.64	2.17	74.08	0.0369	700.1	700.1	0.00	0.00	0.00	411	38 280
		5	100	1.69	16.90	4135	96	43	0.61	2.33	73.75	0.0383	1407.8	1400.5	7.37	0.07	0.53	409	39 303
		5	200	2.68	13.40	7150	130	55	0.63	3.64	72.75	0.0442	2564.1	2543.6	20.53	0.10	0.81	375	48 732
		5	500	6.29	12.58	17482	180	97	0.68	5.15	73.37	0.0450	6872.5	6818.6	53.89	0.11	0.79	360	64 855
		5	1000	11.47	11.47	33811	243	139	0.69	7.19	73.77	0.0464	13838.6	13689.1	149.52	0.15	1.09	339	82 485
	Niv 2 - 10 mn	10	50	0.77	15.31	1908	91	21	0.52	2.38	70.76	0.0415	666.2	652.7	13.52	0.27	2.07	401	36 463
		10	100	1.49	14.94	3802	115	33	0.70	3.03	73.39	0.0413	1384.2	1358.9	25.31	0.25	1.86	393	45 260
		10	200	2.71	13.54	6992	137	51	0.79	3.92	73.50	0.0451	2842.6	2671.5	171.02	0.86	6.40	387	53 113
		10	500	5.87	11.75	16542	209	79	0.87	6.33	72.94	0.0475	7357.3	6826.8	530.55	1.06	7.77	355	74 341
		10	1000	10.25	10.25	29793	244	122	0.87	8.20	72.41	0.0528	14825.8	13537.9	1287.86	1.29	9.51	344	84 048
	Niv 2 - 15 mn	15	50	0.86	17.29	2140	93	23	0.73	2.17	73.16	0.0369	808.0	743.0	65.03	1.30	8.75	404	37 597
		15	100	1.37	13.66	3575	132	27	0.83	3.70	72.80	0.0438	1525.0	1345.0	180.03	1.80	13.39	382	50 595
		15	200	2.44	12.21	6672	163	41	0.78	4.88	72.51	0.0473	3206.3	2800.3	405.95	2.03	14.50	366	59 550
		15	500	5.20	10.41	14988	227	66	0.95	7.58	72.36	0.0526	7993.8	6690.3	1303.53	2.61	19.48	347	78 840
		15	1000	9.42	9.42	27530	267	103	1.09	9.71	71.86	0.0571	16601.0	13624.7	2976.34	2.98	21.85	342	91 414
	Niv 2 - 20 mn	20	50	0.81	16.21	1923	87	22	0.73	2.27	73.50	0.0413	773.7	685.4	88.27	1.77	12.88	422	36 848
		20	100	1.37	13.72	3533	126	28	0.76	3.57	73.09	0.0445	1554.3	1301.1	253.28	2.53	19.47	388	48 990
		20	200	2.38	11.91	6604	174	38	1.01	5.26	72.76	0.0477	3516.5	2789.6	726.87	3.63	26.06	361	62 689
		20	500	4.90	9.79	14126	239	59	1.13	8.47	71.69	0.0559	8952.9	6882.8	2070.10	4.14	30.08	347	82 986
		20	1000	8.62	8.62	25226	280	90	1.16	11.11	71.13	0.0623	17687.2	13182.2	4505.08	4.51	34.18	342	95 776
	Niv 2 - 30 mn	30	50	0.71	14.15	1727	102	17	0.91	2.94	73.21	0.0453	962.3	711.3	251.02	5.02	35.29	410	41 628
		30	100	1.11	11.08	3028	168	18	1.05	5.56	72.71	0.0522	1838.3	1365.7	472.62	4.73	34.61	366	61 581
		30	200	1.97	9.83	5645	245	23	1.38	8.70	71.08	0.0559	4039.8	2669.2	1370.64	6.85	51.35	348	85 494
		30	500	4.46	8.92	13035	290	45	1.50	11.11	71.43	0.0601	10047.1	6575.6	3471.47	6.94	52.79	342	99 122
		30	1000	8.25	8.25	24507	322	76	1.49	13.16	70.84	0.0641	21137.3	13727.5	7409.85	7.41	53.98	337	108 522

	FdT (mn)	Effectifs	Emissions (tonnes)	E unitaire (kg/pers)	Distance (km)	Distance moyenne tournée (km)	Nb- tournées	Densité de remplissage	Taux de regroupement	Vitesse moyenne (km/h)	VPK	Temps- TAD	Temps- VP	Tps supplémentaire TAD (mn)	Tps supp course (mn)	% tps supp	E/km (g)	E/veh (g)
TAD Niv 3	Niv 3 - 5 mn	5	50	0.54	10.80	446	20	0.55	2.27	63.81	0.1849	170.6	158.4	12.28	0.25	7.75	1 211	24 556
		5	100	0.87	8.69	821	25	0.62	3.03	63.57	0.1933	392.3	346.5	45.80	0.46	13.22	1 058	26 320
		5	200	1.30	6.52	1644	40	0.59	4.88	64.62	0.1970	771.3	715.8	55.45	0.28	7.75	794	31 826
		5	500	2.53	5.06	3559	55	0.78	7.69	64.51	0.2205	2056.4	1737.5	318.99	0.64	18.36	711	38 909
		5	1000	4.34	4.34	6482	65	0.80	10.00	64.54	0.2390	4261.3	3422.2	839.14	0.84	24.52	669	43 372
	Niv 3 - 10 mn	10	50	0.46	9.11	449	25	0.80	2.78	63.41	0.1807	247.5	191.8	55.72	1.11	29.05	1 014	25 310
		10	100	0.76	7.56	751	27	0.71	3.57	63.10	0.2145	458.7	334.5	124.18	1.24	37.13	1 007	26 992
		10	200	1.17	5.86	1406	39	0.96	5.56	63.75	0.2250	1071.3	684.9	386.48	1.93	56.43	834	32 554
		10	500	2.13	4.25	3179	65	0.98	10.20	64.12	0.2481	2766.0	1686.7	1079.32	2.16	63.99	669	43 375
		10	1000	3.80	3.80	6051	82	1.25	13.51	64.28	0.2583	6227.6	3569.1	2658.53	2.66	74.49	628	51 354
	Niv 3 - 15 mn	15	50	0.41	8.18	415	28	0.80	3.33	63.57	0.1978	243.0	168.2	74.79	1.50	44.46	985	27 271
		15	100	0.65	6.49	762	36	0.89	4.76	65.38	0.2085	647.3	363.1	284.22	2.84	78.28	852	30 907
		15	200	0.97	4.86	1317	53	1.06	8.00	64.32	0.2374	1273.3	695.1	578.21	2.89	83.19	738	38 850
		15	500	2.05	4.09	3015	67	1.15	11.11	64.18	0.2651	3537.7	1736.4	1801.32	3.60	103.74	678	45 456
		15	1000	3.34	3.34	5490	95	1.53	17.24	64.07	0.2822	7321.1	3501.8	3819.33	3.82	109.07	609	57 655
	Niv 3 - 20 mn	20	50	0.42	8.42	414	30	0.90	3.57	64.27	0.1929	355.9	188.6	167.32	3.35	88.72	1 019	30 088
		20	100	0.60	5.97	703	35	1.00	5.00	64.09	0.2354	650.9	316.5	334.37	3.34	105.64	849	29 853
		20	200	0.88	4.42	1227	56	1.35	9.09	64.04	0.2653	1518.9	647.0	871.88	4.36	134.75	721	40 202
		20	500	1.77	3.54	2723	76	1.43	13.89	64.54	0.2874	3841.9	1667.0	2174.83	4.35	130.46	650	49 174
		20	1000	3.00	3.00	4983	104	1.71	20.83	63.83	0.3072	7879.7	3386.4	4493.30	4.49	132.69	602	62 515
	Niv 3 - 30 mn	30	50	0.41	8.12	392	26	0.93	3.33	63.18	0.2059	354.8	165.8	189.07	3.78	114.06	1 036	27 055
		30	100	0.55	5.47	655	36	1.13	5.56	64.15	0.2322	714.1	357.0	357.04	3.57	100.00	836	30 403
		30	200	0.87	4.37	1180	54	1.47	9.09	63.87	0.2721	1705.7	668.1	1037.59	5.19	155.31	740	39 722
		30	500	1.67	3.33	2549	80	1.63	15.63	63.56	0.3024	4688.5	1694.3	2994.24	5.99	176.73	653	52 045
		30	1000	2.98	2.98	5275	132	1.92	25.00	64.14	0.3091	9817.8	3513.1	6304.68	6.30	179.46	566	74 610

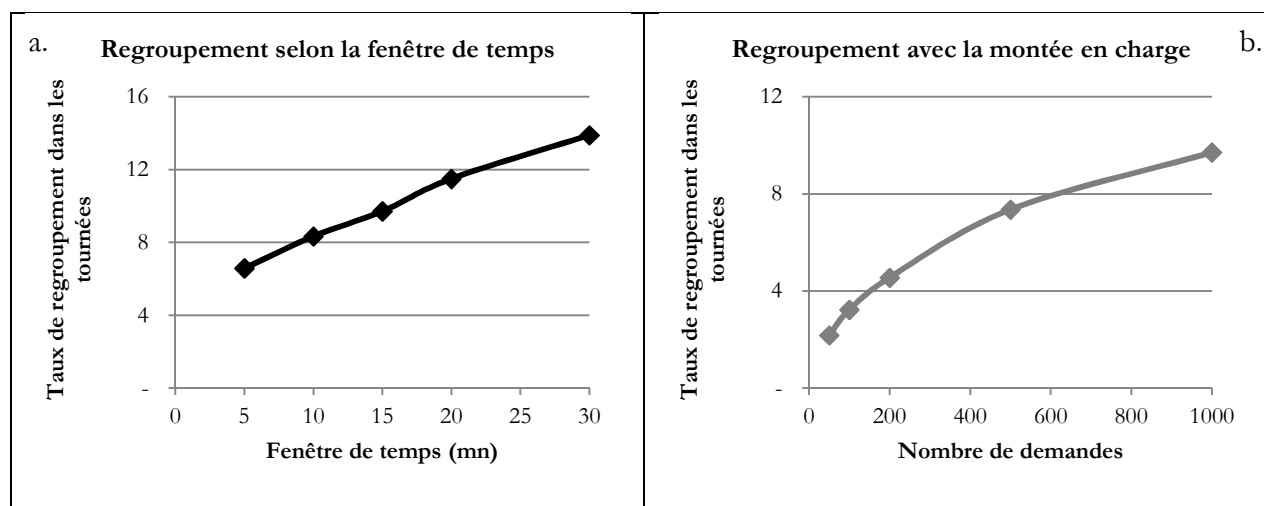
	Effectifs	Émissions (tonnes)	E unitaire (kg/pers)	Distance (km)	Vitesse moyenne (km/h)	E/km (g)	E/veh (g)
VP - Niv 1	50	1.61	32.27	6042	92	267	32 268
	100	3.34	33.42	13309	94	251	33 422
	200	6.41	32.04	24445	93	262	32 036
	500	16.71	33.42	64821	93	258	33 416
	1000	33.24	33.24	128605	93	258	33 235
VP - Niv 2	50	0.76	15.18	1041	77	729	15 181
	100	1.55	15.54	2072	76	750	15 542
	200	2.97	14.84	3649	75	814	14 842
	500	7.57	15.14	9908	76	764	15 141
	1000	15.31	15.31	19934	76	768	15 307
VP - Niv 3	50	0.66	13.11	191	65	3 439	13 114
	100	1.41	14.07	422	66	3 336	14 069
	200	2.95	14.77	881	66	3 351	14 765
	500	7.19	14.38	2130	66	3 375	14 379
	1000	14.19	14.19	4128	66	3 437	14 188

Annexe 7. Graphique complémentaires – Agglomération d'Avignon

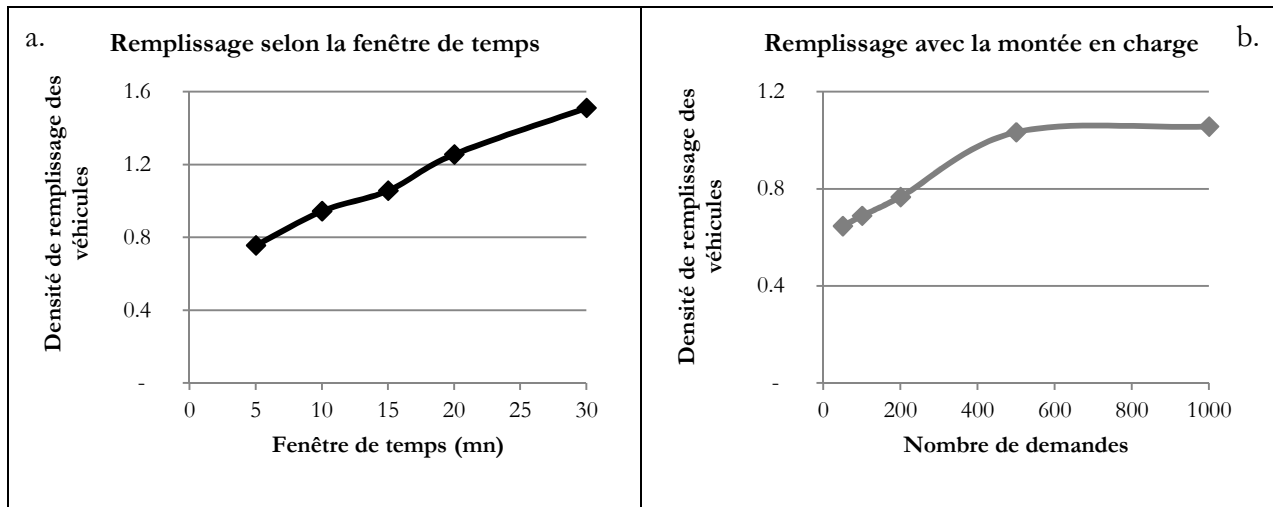
Graphique 19. Évolution du nombre de véhicules selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; a : effectifs = 1 000 ; b : fenêtre de temps = 15 mn)



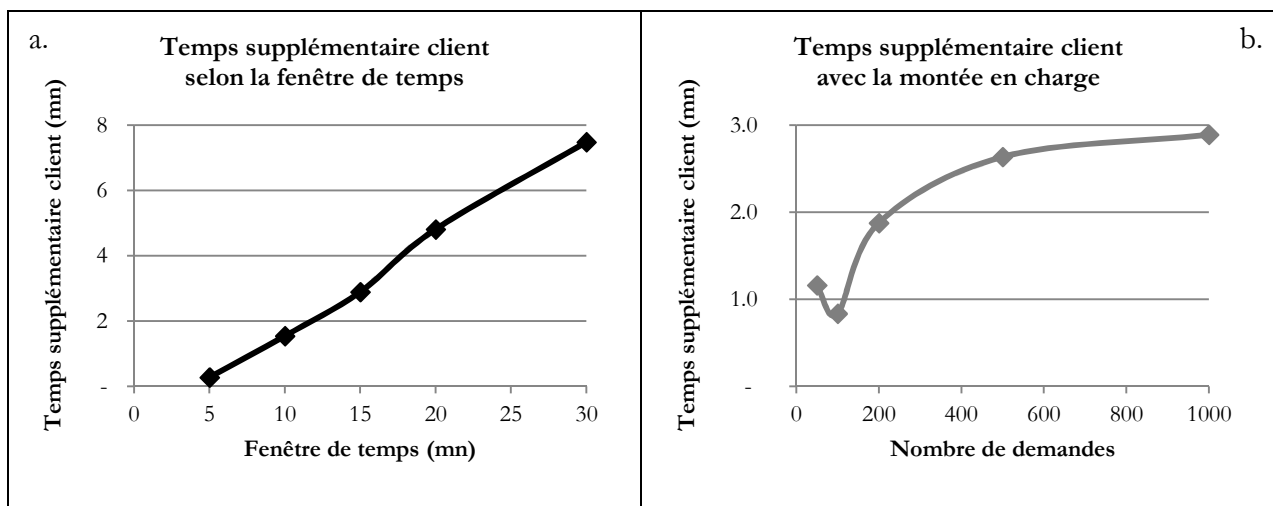
Graphique 20. Variation du taux de regroupement selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; a : effectifs = 1 000 ; b : fenêtre de temps = 15 mn)



Graphique 21. Évolution du remplissage de véhicules selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; a : effectifs = 1 000 ; b : fenêtre de temps = 15 mn)



Graphique 22. Variation du temps supplémentaire de trajet par client selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)
(Avignon, 59 arrêts, 6 dépôts ; a : effectifs = 1 000 ; b : fenêtre de temps = 15 mn)



Références

ADEME (2012), « ADEME », <http://www2.ademe.fr>.

Agence européenne pour l'environnement (2012), « Agence européenne pour l'environnement », <http://www.eea.europa.eu>.

Allemand S. (2006), *Le développement durable : au regard de la prospective du présent*, Paris, L'Harmattan.

Allemand S. (2007), *Les paradoxes du développement durable*, Paris, Le Cavalier bleu.

André M., Rapone M. et Joumard R. (2006), « Analysis of the cars pollutant emissions as regards driving cycles and kinematic parameters », INRETS-LTE.

Atahran A. (2012), *Étude et résolution d'un problème de Transport à la Demande multicritère*, François Rablais - Tours.

Bailly J.-P. et Heurgon E. (2001), « Nouveaux rythmes urbains et organisation des transports », rapport public, CNT.

Ballet J., Dubois J.-L. et Mahieu F.-R. (2011), « La soutenabilité sociale du développement durable : de l'omission à l'émergence », *Mondes en développement*, vol. 156, n°4, pp. 89.

Ballet J., Mahieu F.-R. et Dubois J.-L. (2004), « A la recherche du développement socialement durable: concepts fondamentaux et principes de base », *Développement durable et territoires*.

Banos A., Izembard A. et Josselin D. (2002), « Les services de transport à la demande dans leur marché et leur cadre institutionnel – étude de faisabilité d'un repositionnement socio-économique de ces marchés », THÉMA et VIA-GTI - Rapport d'étape PREDIT.

Barbier E.B. et Markandya A. (1990), « The conditions for achieving environmentally sustainable development », *European Economic Review*, vol. 34, n°2-3, pp. 659-669.

Barthélemy M. (2010), « Spatial Networks », Institut de Physique Théorique, CEA.

Bathelot B. (2011), « Le glossaire illustré du marketing ».

Batty M. (2004), « Distance in space syntax », CASA working papers series n°75, University College London.

Beaud M. (1994), « Face à la croissance mortifère, quel développement durable ? » Jean Masini (dir.), *Tiers-Mondes*, vol. 35, n°137, pp. 131-149.

Beguin H. et Thomas I. (1997), « «Morphologie du réseau de communication et localisations optimales d'activités. Quelle mesure pour exprimer la forme d'un réseau?» », *Cybergéo*.

Berezowska-Azzag E. (2008), « Management of urban development thresholds as an environmental challenge », in *Techniques and technologies for sustainability proceedings: international conference and summer school 2007*, Berlin, Univ.-Verl. der TU, Univ.-Bibliothek.

Berge C. (1963), *Théorie des graphes et ses applications*, Paris, Dunod.

Besancenot J.-P. (2002), « Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines », *Environnement Risques et Santé*.

- BIT (1976)**, « Employment, growth and basic needs : a one world problem », Genève, BIT.
- Boillat P. (2007)**, « De la mobilité à la mobilité durable : politiques de transport en milieu urbain », Observatoire Universitaire de la Mobilité - Université de Genève, 2007.
- Boillat P. et Pini G. (2005)**, « De la mobilité à la mobilité durable : politiques de transport en milieu urbain », in *Enjeux du développement urbain durable: transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance*, PPUR presses polytechniques.
- Boiteux M. (2001)**, « Transports : choix des investissements et coût des nuisances », Commissariat général au plan.
- Bolot J. (2006)**, *Le transport à la demande, une piste pour le développement urbain durable - Approche géographique et mise en œuvre d'un système opérationnel à Besançon*, Besançon, Université de Franche-Comté.
- Bonhoure G. (2005)**, « SVT : quelle contribution de la discipline au développement durable », in *Le développement durable : approches plurielles*, Hatier.
- Bonnafeux A. et Masson S. (2003)**, « Évaluation des politiques de transports et équité spatiale ».
- Bourdages J. et Champagne E. (2012)**, « Penser la mobilité durable au-delà de la planification traditionnelle du transport » Eric Champagne et Paula Negron-Poblete (dir.), *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 11.
- Breton E. Le (2001)**, « Le transport à la demande comme innovation institutionnelle », *Flux (Noisy-le-Grand)*, pp. 58–69.
- Brodhag C. (2005)**, « Entre l'homme et l'environnement il faut choisir », in *Le développement durable : les termes du débat*, [Paris], Armand Colin.
- Brundell-Freij K. et Ericsson E. (2005)**, « Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 10, n°3, pp. 213–229.
- Brunel S. (2012)**, *Le développement durable*, Paris, Presses universitaires de France.
- Brunet R. et Dollfus O. (1990)**, *Mondes nouveaux*, Paris; Montpellier, Hachette ; RECLUS.
- Bürgermeier B. (2005)**, *Économie du développement durable*, Bruxelles, De Boeck.
- Busacker R.G. et Saaty T.L. (1965)**, *Finite graphs and networks*, New York, McGraw-Hill.
- Cans C. (2003)**, « Le développement durable en droit interne: droit des apparences et apparences de droit », *AJDA*, vol. 5.
- Castex É. et Josselin D. (2007)**, « Temporalités éclatées: la réponse des transports à la demande aux nouvelles formes de mobilité », *Espace populations sociétés. Space populations societies*, n°2007/2-3, pp. 433-447.
- Castex E. (2007)**, *Le Transport À la Demande (TAD) en France : de l'état des lieux à l'anticipation. Modélisation des caractéristiques fonctionnelles des TAD pour développer les modes flexibles de demain*, Université d'Avignon.
- Caubel D. (2003)**, « Outils et méthodes d'évaluation des enjeux / impacts sociaux d'une politique de transports urbains : le concept d'accessibilité ».

CEMT (1998), « Politiques de transport durable », n°8.

Centre d'actualités de l'ONU (2007), « Jean Ziegler qualifie le recours aux biocarburants de “crime contre l'humanité” ».

Chanut S. et Chevallier E. (2011), « Estimation des impacts atmosphériques des projets de gestion de trafic : de l'application des modèles théoriques sur des cas concrets », *Recherche Transports Sécurité*.

Chenery H.B. (1974), *Redistribution with growth: policies to improve income distribution in developing countries in the context of economic growth*, London, Published for the World Bank and the Institute of Development Studies, University of Sussex [by] Oxford University Press.

Chevrier R. (2008), *Optimisation de transport à la demande dans des territoires polarisés*, Université d'Avignon.

Clanché F. et Rascol O. (2011), « Le découpage en unités urbaines de 2010 - L'espace urbain augmente de 19% en une décennie », INSEE Première n°1364, INSEE.

Cole, H., Freeman, C., Jahoda, M. et Pavitt, K. (dir.) (1974), *L'anti-Malthus : une critique de « Halte à la croissance »*, Paris, Seuil.

Commission mondiale sur l'environnement et le développement (1987), *Notre avenir à tous, (Rapport Brundtland)*, Editions du Fleuve et Publications du Québec.

Cornia G.A., Jolly R. et Steward F. (1987), *Adjustment With A Human Face*, Oxford, Clarendon Press.

Cunha A. Da, Knoepfel P., Leresche J.P. et Nahrath S. (2005), *Enjeux du développement urbain durable : transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance*, PPUR presses polytechniques.

Davis M. (2008), « Écologie en temps de guerre. Quand les États-Unis luttèrent contre le gaspillage des ressources », *Mouvements*, vol. n°54, n°2, pp. 93-98.

Davy L. (1970), « Hydrologie, Mélanges offerts à Maurice Pardé », *Méditerranée*, vol. 1, n°2, pp. 198-201.

Degobert P. (1992), *Automobile et pollution*, Editions Technip.

Desiderio M. (2005), « Les transports à la demande aux États-Unis », Mission économique de Washington.

Desrochers M. (1988), « An algorithm for the shortest path problem with resource constraints », Rapport technique, Les cahiers du GERAD, Montréal, HEC.

Diana M., Quadrifoglio L. et Pronello C. (2007), « Emissions of demand responsive services as an alternative to conventional transit systems », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, n°3, pp. 183-188.

Doulet J.-F. (2006), « Comment en Chine la mobilité change les villes ».

Dubois J.-L. (1996), « L'expérience du programme Dimensions sociales de l'ajustement : aspects méthodologiques et réflexions d'ensemble », *Cahier des Sciences Humaines*, vol. 32, n°2, pp. 379-402.

Dubois-Maury J. (2006), « Le développement durable saisi par le juriste », in *Le développement durable : approches plurielles*, Paris, Hatier.

Dubus N., Helle C. et Masson-Vincent M. (2010), « De la gouvernance à la géogouvernance : De nouveaux outils pour une démocratie LOCALE renouvelée » Gerald Billard (dir.), *L'Espace Politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique*, n°10.

- Dupuy G. (1991)**, *L'urbanisme des réseaux : théories et méthodes*, Paris, A. Colin, Collection U. Géographie.
- Dupuy G. (1999)**, *La dépendance automobile : symptômes, analyses, diagnostic, traitements*, Paris, Anthropos, Collection Villes.
- Durant G. (1997)**, « La nouvelle économie géographique : agglomération et dispersion », *Économie & prévision*, pp. 1-24.
- Duvigneaud P. (1980)**, *La Synthèse écologique : populations, communautés, écosystèmes, biosphère, noosphère*. Paris, Doin.
- Escourrou G. (1990)**, « La spécificité du climat de l'agglomération parisienne », *Revue de géographie de Lyon*, vol. 65, n°2, pp. 85-89.
- Faucheux S. et Noël J.-F. (1990)**, *Les Menaces globales sur l'environnement*, Paris, Editions La Découverte.
- Ferry L. (2002)**, *Le nouvel ordre écologique: l'arbre, l'animal et l'homme*, Paris, B. Grasset.
- Flamm M. (2004)**, *Comprendre le choix modal. Les déterminants des pratiques modales et les représentations individuelles des moyens de transport.*, Lausanne, EPFL.
- Foltête J.-C. (2007)**, « Quel rôle du réseau de voirie urbaine sur la distribution des flux piétons ? », *Les Cahiers scientifiques du transport*, n°52, pp. 27 □ 44.
- Foltête J.-C., Genre-Grandpierre C. et Josselin D. (2011)**, « Impacts of Road Networks on urban mobility », in Marius Thériault et François Des Rosiers (dir.), *Modeling urban dynamics: mobility, accessibility and real estate value*, London : John Wiley and Sons, ISTE Ltd.; Hoboken, NJ.
- Freeman L.C. (1977)**, « A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness », *Sociometry*, vol. 40, n°1, pp. 35-41.
- Frontier S. et Pichod-viale D. (1998)**, *Écosystèmes : structure, fonctionnement, évolution*, Paris, Dunod.
- Garaix T. (2007)**, *Étude et résolution exacte de problèmes de transport à la demande avec qualité de service*, Université d'Avignon.
- Genre-Grandpierre C. (2000)**, *Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes*, Université de Franche-Comté.
- Genre-Grandpierre C. (2011)**, « L'efficacité des déplacements automobiles en milieu urbain », in *Données urbaines*, Economica, Villes.
- George P. (1971)**, *L'Environnement*, PUF, Que sais-je ?
- Giorgi L. (2003)**, « Mobilité durable. Enjeux, possibilités et conflits. Le regard des sciences sociales », *Revue internationale des sciences sociales*, vol. 176, n°2, pp. 201-205.
- Grübler A. (1990)**, *The rise and fall of infrastructures : dynamics of evolution and technological change in transport*, Laxenberg, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Gumuchian H. (2003)**, *Les acteurs, ces oubliés du territoire*, Paris, Anthropos.
- Hecker A. (2009)**, « Urbanisme, société et mobilité durable en Allemagne », *Revue Géographique de l'Est*, vol. 47, n°1.

Henson R. et Essex S. (2003), « Conception, organisation et évaluation de réseaux de transport locaux durables », *Revue internationale des sciences sociales*, vol. 176, n°2, pp. 243-260.

Hickman J., Hassel D., Joumard R., Samaras Z. et Sorenson S. (2003), « Environnement, energy and transport. Written material extended version by EU-PORTAL, transport teaching material, based on MEET and COST program ».

Hillier B. et Hanson J. (1988), *The social logic of space*, Cambridge [England]; New York, Cambridge University Press.

IFPEN (2013), « Quel avenir pour les biocarburants ? », www.ifpenergiesnouvelles.fr.

Int Panis L., Broekx S. et Liu R. (2006), « Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits », *Science of The Total Environment*, vol. 371, n°1-3, pp. 270-285.

Janine D. (1972), *Halte la croissance ? Enquête sur le club de Rome. Suivi de rapport sur les limites à la croissance*, Fayard, 1972 (Ecologie).

Jarret M.-F. et Mahieu F.-R. (2002), *La Côte d'Ivoire : de la déstabilisation à la refondation*, L'Harmattan.

Josselin D. et Genre-Grandpierre C. (2005), « Des transports à la demande pour répondre aux nouvelles formes de mobilité. Le concept de Modulobus. », in *Mobilités et Temporalités*, Bruxelles, Publications de l'Université Saint Louis, pp. 151-164.

Joumard R., André M., Vidon R., Tassel P. et Pruvost C. (2000), « Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars », *Atmospheric Environment*, vol. 34, n°27, pp. 4621-4628.

Joumard R., Philippe F. et Vidon R. (1999), « Reliability of the current models of instantaneous pollutant emissions », *The Science of The Total Environment*, vol. 235, n°1-3, pp. 133-142.

Joumard R., Vidon R., Pruvost C., Tassel P. et Soete G. De (1995), « Evolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ à froid », *Science of The Total Environment*, vol. 169, n°1-3, pp. 185-193.

Kansky K.J. (1963), « Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics. », Research paper n°84, University of Chicago. Department of geography.

Köhler J., Whitmarsh L., Nykvist B., Schilperoord M., Bergman N. et Haxeltine A. (2009), « A transitions model for sustainable mobility », *Ecological Economics*, vol. 68, n°12, pp. 2985-2995.

Kruskal J.B. (1956), « On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem », *Proceedings of the American Mathematical Society*, vol. 7, n°1, pp. 48-50.

Laganier R., Villalba B. et Zuindeau B. (2002), « Le développement durable face au territoire : éléments pour une recherche pluridisciplinaire », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*.

Larousse (2012), *Dictionnaire de français*.

Le Grand Robert (2012), *Le Grand Robert de la langue française*.

Madre J.-L., Armoogum J., Bouffard-Savary É., Caenen Y. et Couderc C. (2010), « La mobilité des français, panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008 », La revue du CGDD, Commissariat général au développement durable.

Malherbe L. et Rouil L. (2003), « Méthodes de représentation de la qualité de l'air Guide d'utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire », Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air - INERIS.

Mancebo F. (2006), *Le développement durable*, Paris, A. Colin.

Marsh G.P. (1864), *Man and nature ; or, Physical geography as modified by human action*, New York, C. Scribner.

Meunier C. et Zeroual T. (2006), « Transport durable et développement économique », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*.

Mignot D. (2004), « Transport et justice sociale », *Reflets et perspectives de la vie économique*, vol. XLIII, n°4, pp. 123.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2012), « 20 ans de développement durable en France - Ministère du Développement durable ».

Moriconi-Ebrard F. (1993), *L'urbanisation du monde depuis 1950*, Economica, Villes.

Moriconi-Ebrard F. (2000), *De Babylone à Tokyo: les grandes agglomérations du monde*, Ophrys.

Mouchot C. (2003), *Méthodologie économique*, Paris, Seuil.

Ntziachristos L. et Samaras Z. (2009), « Exhaust emissions from road transport. EMEP/EEA emission inventory guidebook - COPERT ».

OCDE (2007), *L'impact environnemental des transports*, Paris, Organisation for Economic Co-operation and Development.

Paterson M. (2007), *Automobile politics: ecology and cultural political economy*, Cambridge ; New York, Cambridge University Press.

Penn A., Hillier B., Banister D. et Xu J. (1998), « Configurational modelling of urban movement networks », *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 25, n°1, pp. 59-84.

Perroux F. (1994), *Pouvoir et économie généralisée*, Grenoble, PUG, Œuvres complètes de François Perroux.

Quinet E. (2005), *16e Symposium international sur la théorie et la pratique dans l'économie des transports 50 ans de recherche en économie des transports - L'expérience acquise et les grands enjeux: 50 ans de recherche en économie des transports - L'expérience acquise et les grands enjeux*, European Conference of Ministers of Transport (dir.) OECD Publishing.

Raux C. et Souche S. (2001), « L'acceptabilité des changements tarifaires dans le secteur des transports : comment concilier efficacité et équité ? », *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, vol. octobre, n°4, pp. 539.

Reclus E. (1866), « Du sentiment de la nature dans les sociétés modernes », *Revue des deux mondes*, n°63, pp. 352-381.

Reclus E. (1868), *La terre. Description des phénomènes de la vie du globe.*, Paris, Hachette.

Rubens L., Gosling P. et Moch A. (2011), « Favoriser le report modal : connaître les raisons liées au choix d'un mode de déplacement pour le changer », *Pratiques Psychologiques*, vol. 17, n°1, pp. 19-29.

Sachs I. (1980), *Stratégies de l'écodéveloppement*, Paris, Éditions Économie et humanisme : Éditions ouvrières, Collection Développement et civilisations.

- Sauer C.O. (1925)**, « The morphology of landscape », *Geography, University of California Publications*, vol. 2, n°2.
- Savelsberg et Sol (1995)**, « The general pickup and delivery problem », *Transportation Science*, vol. 1, n°29, pp. 17-29.
- Schafer A. et Victor D.G. (2000)**, « The future mobility of the world population », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 34, n°3, pp. 171-205.
- Seibel P. (2005)**, *Practical COMMON LISP*, Berkeley, CA, Apress, The Expert's voice in programming languages.
- Smit R., Smokers R. et Rabé E. (2007)**, « A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+ », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, n°6, pp. 414-422.
- Streeten P. (1979)**, « From growth to basic needs », *Finance Development*, vol. 16, n°3, pp. 28-31.
- Surell A. (1841)**, *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*, Paris, Carilian-Goeury et Dalmont.
- Thevenin T. (2002)**, *Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains. Une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisonnaine.*, Besançon, Université de Franche-Comté.
- Theys J. (2002)**, « L'approche territoriale du “ développement durable ”, condition d'une prise en compte de sa dimension sociale ».
- Thomann S. (2002)**, « Report modal en péri-urbain et représentations de l'installation résidentielle », n°00MT52, Ministère des Transports - DRAST - PREDIT.
- Torres E. (2002)**, « Adapter localement la problématique du développement durable : rationalité procédurale et démarche-qualité », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*.
- Tricart J. et Kilian J. (1978)**, *L'Eco-géographie*, Masson.
- Union européenne. Commission européenne (2001)**, *La politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix : livre blanc*, Luxembourg, Office des publications officielles des Communautés européennes.
- Veyret Y. (2005)**, *Le développement durable : approches plurielles*, Paris, Hatier.
- Veyret Y. et Vigneau J.-P. (2004)**, « Risques et développement durable », *Bulletin de l'APHG*.
- Vincent M.M., Dubus N., Bley D., Voiron C., Helle C., Cheylan J.-P., Douart P., Douguedroit A., Ferrier J.-P., Jacob F., Lampin C., Maignant G. et Piot J.-Y. (2012)**, « La Géogouvernance : un concept novateur ? », *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- Vivian H. et Edouard J.L. (1982)**, « La nouvelle hydrologie d'une vallée alpine : La Maurienne », *Revue de géographie alpine*, vol. 70, n°3, pp. 257-278.
- Vivien F.-D. (2001)**, « Histoire d'un mot, histoire d'une idée : le développement durable à l'épreuve du temps », in *Le développement durable, de l'utopie au concept : de nouveaux chantiers pour la recherche*, Paris [etc.], Ed. scientifiques et médicales Elsevier.
- Vogt J. (1962)**, « A propos de la morphologie des confins du Limousin et du Périgord », *Revue de géographie alpine*, vol. 50, n°1, pp. 121-126.
- Voiron-Canicio C. (2005)**, « Pour une approche systémique du développement durable », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*.

Wicherek S. (1993), *Farm Land Erosion: in Temperate Plains Environments and Hills*, Elsevier.

Wiel M. (2010), *Étalement urbain et mobilité*, Paris, La Documentation française.

Zahavi Y. (1974), « Traveltime budgets and mobility in urban areas », U.S Department of transportation.

Zhao X. (2011), *Algorithmes pour les problèmes de tournées à la demande*, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Zidi I. (2012), *Modélisation et Optimisation d'un Système de Transport à la Demande Multicritère et Dynamique*, École Centrale de Lille, École nationale des sciences de l'informatique (Tunis).

Zuindeau B. (1996), « La problématique du développement durable : les enseignements de l'approche spatiale ».

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	5
Sommaire.....	9
Introduction générale.....	11
Partie I.L'étude des impacts environnementaux des transports routiers dans un contexte de durabilité : vers des transports durables ?.....	17
Introduction	19
Chapitre 1 Un contexte de développement durable	20
1. Petite histoire du développement durable – vers une chronologie comparée.....	22
A. Une histoire officielle par les « faits »	23
B. Des questionnements anciens qui varient selon les disciplines.....	29
a. L'approche de l'économiste.....	29
b. L'approche de l'écologue	31
c. L'approche du sociologue.....	32
d. L'approche du géographe	35
e. L'approche du juriste	39
2. Convergences et divergences des enjeux : aller vers un consensus et une implication forte des populations concernées.....	40
A. Des représentations graphiques pas toujours opportunes	42
B. Une nécessaire implication de la population	45
C. Une appropriation du développement durable différente selon les territoires : exemple comparé du Québec et de la France.....	47
D. Compromis versus consensus.....	48
Conclusion.....	50
Chapitre 2 La mobilité durable	53
1. Vers une ville durable	53
A. Définitions de la ville	53
B. La ville, un objet durable ?.....	54
C. La ville comme levier d'action pour une société durable	56
2. Pour une mobilité durable	57
A. Ce que recouvre le concept de mobilité durable	58
B. Systèmes de transports et durabilité.....	62
a. Approches économiques pour des systèmes de transports durables	62
□ Internalisation des externalités des transports	62
□ Découplage mobilité/croissance économique.....	63
□ Équité spatiale des politiques de transport	67
b. Aspects sociaux des transports	68

c.	Impacts environnementaux des transports	69
□	Pressions sur la nature et les paysages.....	70
□	Bruit.....	71
□	Automobiles et pollutions atmosphériques.....	72
Conclusions sur le transport durable.....		74
Chapitre 3	Les TAD, une réponse à la durabilité ?.....	75
1.	Quelques repères sur les transports à la demande	75
A.	Définitions	75
B.	Différentes stratégies de TAD.....	76
a.	Lignes fixes à déclenchement ou lignes virtuelles	76
b.	TAD en rabattement	77
c.	Point-à-point.....	77
C.	Les freins au développement des TAD	78
a.	Les habitudes et les représentations	78
□	Représentations sociales de l'automobile : un bénéfice individuel important.....	78
□	Représentations sociales des transports collectifs : des bénéfices collectifs.....	79
□	Un report modal nécessaire	79
b.	L'aptitude des usagers à utiliser les transports	80
c.	Des contraintes temporelles.....	81
2.	TAD et durabilité : premiers éléments.....	81
A.	Cas des lignes à déclenchement : moins coûteux, moins social.....	82
B.	Cas des TAD en porte-à-porte : un système idéal du point de vue social.....	83
C.	Cas des TAD mis en place pour évaluer les besoins sur un territoire.....	83
D.	Une évaluation environnementale complexe	84
E.	Des études sur l'impact environnemental des TAD.....	85
Chapitre 4	L'estimation des émissions de polluants par les véhicules à moteur thermique	89
1.	Mécanismes en jeu dans la création des polluants par les moteurs.....	89
A.	Des réactions chimiques à l'origine des polluants.....	90
B.	Paramètres impliqués dans la variation des quantités de polluants émises.....	92
	Critères liés aux véhicules :	92
	Critères liés à la circulation :	92
	La température du moteur.....	93
2.	Différentes modélisations des émissions de polluants	94
A.	Estimation des quantités de polluants émises : différentes approches à différents niveaux de précision	96
B.	Des programmes européens pour la création d'un modèle d'émission toujours plus précis.....	97
a.	MEET	98
□	Calcul des émissions en circulation	98
□	Intégration des surémissions au démarrage	99

b. COPERT IV	100
□ Calcul des émissions en circulation.....	101
□ Intégration des surémissions au démarrage.....	102
Synthèse de la Partie I.....	104
Partie II. Prendre en compte les composantes techniques et géographiques des systèmes de transport pour mieux évaluer les émissions	107
Introduction	109
Chapitre 5 Des leviers d'action structurels pour optimiser les performances environnementales des TAD.....	111
1. La configuration spatio-temporelle de la demande	111
A. Des configurations spatiales	111
B. Des configurations temporelles	114
2. Des caractéristiques des TAD modulables pour en optimiser les performances environnementales	116
A. La souplesse des TAD : entre attrait pour les usagers et contraintes pour l'optimisation du service.....	117
a. Souplesse temps/espace : les clés de l'optimisation.....	117
b. L'analyse territoriale.....	118
B. Objectifs : optimiser les services de TAD	118
a. Des algorithmes pour l'optimisation des TAD.....	119
b. Le problème du voyageur de commerce.....	119
c. Dial-a-Ride Problem (DARP)	121
3. Déterminer l'influence des réseaux routiers sur les performances des TAD	124
A. Une variété d'indicateurs pour caractériser les réseaux	124
B. Décrire les caractéristiques impliquées dans la production d'émissions.....	125
a. Des méthodes d'analyse spatiale pour décrire l'emprise au sol des réseaux routiers	126
□ Description structurelle avec des indicateurs simples de distance	126
b. Description fonctionnelle des réseaux.....	126
□ Analyse des vitesses appliquées sur le réseau	126
□ Contexte topologique des intersections	127
□ Indice de détour	127
□ Efficacité.....	128
□ Homogénéité des vitesses au cours d'un trajet	129
Chapitre 6 Un modèle pour le calcul des émissions de polluants à l'échelle du tronçon de route : GREEN-DRT.....	131
1. Choix de l'environnement de développement : Common Lisp.....	131
2. Le modèle d'émission développé.....	133
A. Le calcul des émissions.....	135
a. Émission à chaud	136
b. Surémission	136
□ Surémission à froid	136
□ Surémission à l'accélération.....	137

B.	Sensibilité du modèle d'émission aux différents paramètres.....	139
a.	Influence de la vitesse sur les émissions à chaud	139
b.	Influence de la température ambiante et de la vitesse sur les surémissions à froid	142
c.	Influence de l'intensité de l'accélération sur les surémissions.....	143
C.	Développements particuliers dans GREEN-DRT	146
Chapitre 7	Une chaîne de traitement pour l'évaluation des différents leviers de la performance environnementale des services de transport	149
1.	Création de la donnée nécessaire pour le calcul des émissions.....	151
A.	Les données en entrée.....	151
a.	Réseaux	151
b.	Arrêts et dépôts	151
c.	Demande	152
B.	Traitements	152
a.	Optimisation des TAD	152
b.	Reconstitution des tournées sur le réseau.....	153
2.	Le calcul et la cartographie des émissions	155
Partie III	Les émissions de polluants induites par les TAD : des effets de seuil	159
Introduction	161
Chapitre 8	Des simulations réalisées à des échelles variées.....	163
1.	Les paramètres des simulations	163
2.	Présentation des cas d'étude	164
A.	Les sources des données sur les réseaux routiers.....	164
B.	Avignon, un réseau contraint.....	166
C.	La région Bretagne, des réseaux à différentes échelles.....	166
a.	La région Bretagne - niveau 1	167
b.	L'agglomération de Rennes - niveau 2	168
c.	La ville de Rennes - niveau 3	169
D.	Réseaux urbains typiques.....	169
a.	Dallas, un réseau orthogonal.....	169
b.	Rennes, un réseau radial	170
c.	Grenoble, un réseau linéaire de vallée.....	171
d.	Nice, un réseau linéaire de littoral.....	172
E.	Synthèse descriptive des réseaux.....	172
3.	Une approche statistiquement validée.....	173

Chapitre 9	Résultats	177
1.	Influence des caractéristiques morphologiques des réseaux sur les distances parcourues	178
A.	Effet de la morphologie des réseaux sur les distances parcourues	179
B.	Effets de la hiérarchisation des réseaux par la vitesse sur les distances parcourues	181
C.	Effets de la hiérarchisation des routes sur les performances des TAD	185
a.	Distances parcourues	185
b.	Distances à vide	186
c.	Regroupement des passagers	188
2.	Variation des quantités de polluants émises selon les vitesses employées et le carburant utilisé	191
A.	Différences d'émissions selon le contexte et le carburant	194
□	L'utilisation du diesel engendre une émission plus importante de CO ₂	195
B.	Le réseau homogène contribue de manière significative à la réduction des différents polluants	196
a.	Le degré d'homogénéité de la vitesse explique le niveau d'émission	197
b.	Localisation des émissions liées à l'accélération sur le réseau routier	199
C.	Répartition spatiale et points chauds d'émissions de polluants selon les vitesses appliquées	201
D.	Comparaison des quantités d'émission produites entre l'usage des véhicules privés et les TAD	203
3.	Réduire le nombre de véhicules et des émissions de polluants avec l'usage des TAD	206
A.	La vitesse permet un meilleur regroupement, ce qui induit une augmentation des temps de trajets pour les clients	208
B.	Des seuils « environnementaux » de TAD variés selon la distribution spatio-temporelle de la demande	209
a.	Performances d'un TAD en réponse à une demande de déplacements polarisés	210
□	Plus le territoire est grand, moins le regroupement est possible	210
□	L'augmentation de la fenêtre de temps et du nombre de voyageurs engendre une diminution des émissions de polluants	214
-	L'effet de la variation de la fenêtre de temps	214
-	L'effet de la montée en charge	218
-	Des configurations optimales pour minimiser les émissions de polluants	222
b.	D'autres répartitions de demandes, d'autres conclusions	230
□	Exemple de TAD mis en place en réponse à des demandes de déplacements concentrés	230
□	Exemple de TAD déployé sur un territoire non-polarisé (toutes directions)	233
	Conclusion générale	235
	Annexes	241
	Références	259
	Table des matières	267
	Table de figures	272
	Table des tableaux	273
	Table des cartes	274
	Table des graphiques	274
	Table des annexes	275

TABLE DE FIGURES

Figure 1. Chronologie comparée de l'apparition du développement durable et du contexte international	28
Figure 2. Modélisation statique du développement durable	43
Figure 3. Le triangle du développement durable : viabilité, efficacité et justice environnementale	44
Figure 4. Une modélisation de la dynamique nécessaire pour obtenir de la durabilité.....	45
Figure 5. Distances des déplacements quotidiens effectués par les américains selon les modes de transport entre 1880 et 1990....	65
Figure 6. Émissions de CO ₂ par les différents modes de transport en France en 2009 (en millions de tonnes)	70
Figure 7. Ligne à déclenchement	77
Figure 8. TAD en rabattement, polarisé	77
Figure 9. TAD de porte -à-porte	78
Figure 10. TAD en arrêt à arrêt	78
Figure 11. Proportions de carburant/comburant et polluants	91
Figure 12. Des déplacements similaires dans un espace zoné.....	112
Figure 13. Des déplacements globalement regroupés dans des aires fonctionnelles	113
Figure 14. Des déplacements très variés dans des espaces apolarisés.....	113
Figure 15. Exemple de configuration horaire en semaine.....	114
Figure 16. Exemple de configuration horaire en week-end.....	115
Figure 17. Fenêtres de temps et optimisation du service de TAD.....	123
Figure 18. Trois graphes différents avec les mêmes indices de connectivité.....	125
Figure 19. Efficacité d'un trajet.....	129
Figure 20. Arborescence des objets dans GREEN-DRT	132
Figure 21. Principe général de GREEN-DRT	134
Figure 22. Trajet et calcul des émissions à l'échelle du tronçon.....	135
Figure 23. Illustration du calcul des surémissions à l'accélération dans GREEN-DRT	138
Figure 24. Importance de l'historique de la composition du trajet dans le calcul des émissions	139
Figure 25. Comportement des émissions à chaud des différents polluants selon la vitesse	141
Figure 26. Comportement des différents polluants en fonction de la vitesse et du carburant dans les surémissions à froid	142
Figure 27. Comportement des différents polluants en fonction de la température et du carburant dans les surémissions à froid.	143
Figure 28. Comportement des émissions de polluants à l'accélération	144
Figure 29. Grandes étapes de la chaîne de traitement et logiciels mobilisés	150
Figure 30. Structure du fichier et usage pour dessiner les itinéraires	154
Figure 31. ModelBuilder itératif pour la construction des tournées.....	154
Figure 32. Traitement d'une feuille de route	155
Figure 33. Situation géographique du réseau routier d'Avignon.....	166
Figure 34. Niveaux d'analyse sur le territoire de Bretagne.....	167
Figure 35. Réseau routier de la région Bretagne (<i>niveau 1</i>)	168
Figure 36. Réseau routier de l'agglomération de Rennes (<i>niveau 2</i>).....	168
Figure 37. Réseau routier de la ville de Rennes (<i>niveau 3</i>).....	169
Figure 38. Situation géographique du réseau routier de Dallas.....	170
Figure 39. Situation géographique du réseau routier de Rennes	171
Figure 40. Situation géographique du réseau routier de Grenoble.....	171
Figure 41. Situation géographique du réseau routier de Nice.....	172
Figure 42. Paramètres de simulations effectuées	177
Figure 43. Modélisation du parcours d'un véhicule du service TAD pour une demande très concentrée	231

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Les principaux polluants primaires d'origine automobile et leurs effets sur la santé publique	73
Tableau 2. Comparaison analytique des caractéristiques des systèmes de transport	87
Tableau 3. Trois approches possibles pour le calcul des émissions de polluants.....	96
Tableau 4 : Comparaison des profils de circulation intégrés dans COPERT IV	100
Tableau 5. Polluants et GES considérés dans GREEN-DRT, selon les contextes de circulation.....	134
Tableau 6. Différences de contexte entre les modèles d'émission COPERT IV/MEET et GREEN-DRT'	147
Tableau 7. Statistiques sur le fonctionnement de service de TAD	148
Tableau 8. Durée approximative de l'optimisation par le noyau selon le nombre de déplacements	153
Tableau 9 : Exemple d'attributs des tronçons après le calcul des émissions.....	156
Tableau 10. Récapitulatif des étapes de traitement et durée approximative de chacune	157
Tableau 11. Probabilité de regroupement des demandes de déplacement.....	163
Tableau 12. Importance des routes et vitesses appliquées sur les réseaux français	165
Tableau 13. Vitesses appliquées sur le réseau de Dallas	165
Tableau 14. Caractéristiques des réseaux routiers analysés	173
Tableau 15. Distances parcourues selon les réseaux routiers.....	180
Tableau 16. Augmentation des distances des TAD par rapport aux VP.....	180
Tableau 17. Indicateurs de description des réseaux.....	180
Tableau 18. Comparaison distances en VP entre réseau à vitesse constante et réseau hiérarchisé.....	181
Tableau 19. Modification des indices « réseau » avec l'application des vitesses sur les réseaux	183
Tableau 20. Comparaison de l'indicateur de Marchand et des vitesses moyennes selon réseaux routiers	183
Tableau 21. Comparaison distances en VP et TAD entre réseau à vitesse constante et réseau hiérarchisé.....	185
Tableau 22. Augmentation des distances parcourues avec l'utilisation des TAD par rapport aux VP selon les réseaux à vitesse constante et les réseaux hiérarchisés.....	186
Tableau 23. Distances parcourues à vide (TAD)	187
Tableau 24. Répartition des distances parcourues à vide (TAD)	188
Tableau 25. Variation du regroupement des clients avec la hiérarchisation des réseaux	190
Tableau 26. Scénarios de vitesses appliqués (km/h)	192
Tableau 27. Émissions produites par 10 000 déplacements sur le réseau d'Avignon	192
Tableau 28. Répartitions des émissions entre les contextes d'émission selon les scénarios de vitesse sur le réseau d'Avignon.....	193
Tableau 29. Répartition des émissions entre les contextes d'émission selon les scénarios de vitesse et les carburants	194
Tableau 30. Quantité d'émissions de chaque polluants et GES selon le carburant et le scénario de vitesse (VP).....	195
Tableau 31. Comparaison des émissions entre VP et TAD selon les scénarios de vitesse.....	203
Tableau 32. Répartition des émissions selon situations TAD – VP.....	204
Tableau 33. Regroupement et remplissage selon les scénarios de vitesse	209
Tableau 34. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps	223
Tableau 35. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 1.....	223
Tableau 36. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps – Niveau 2.....	224
Tableau 37. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 2.....	224
Tableau 38. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps – Niveau 3.....	225
Tableau 39. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 3.....	225
Tableau 40. Impacts moyens de la montée en charge et de la fenêtre de temps sur le gain des émissions de polluants..	226
Tableau 41. Impacts moyens de la montée en charge et de la fenêtre de temps sur le gain des émissions de polluants..	228
Tableau 42. Diminution des émissions unitaires standardisée selon la montée en charge et la fenêtre de temps – Niveau 3.....	228
Tableau 43. Configurations nombre de demandes/fenêtre de temps optimales – Niveau 3.....	228

TABLE DES CARTES

Carte 1. Localisation des flux simulés sur le réseau de Dallas selon la hiérarchisation des tronçons de route.....	184
Carte 2. Localisation des émissions à l'accélération.....	200
Carte 3. Émission de CO ₂ (g) - a.1 réseau homogène ; a.2 réseau rapide ; b. différence d'émission de CO ₂	202
Carte 4. Différences de localisation des émissions de polluants entre VP et TAD.....	205
Carte 5. Exemple de localisation des arrêts et scénario de demande polarisée - Avignon.....	207
Carte 6. Localisation des émissions de polluants selon l'agglomération.....	229

TABLE DES GRAPHIQUES

Graphique 1. Intervalles de confiance ($\alpha = 0.1$) des KPV selon les effectifs de demande – réseau d'Avignon	175
Graphique 2. Intervalles de confiance ($\alpha = 0.1$) des KPV selon les effectifs de demande – réseau de Rennes	175
Graphique 3. Position des différents types de réseaux selon leur niveau d'émission globale et l'homogénéité des vitesses	198
Graphique 4. Répartition absolue et relatives des émissions selon contexte et scénario	204
Graphique 5. Vitesse moyenne de circulation et remplissage/regroupement.....	209
Graphique 6. Émissions et regroupement selon échelle de déploiement d'un TAD.....	212
Graphique 7. Nombre de véhicules et regroupement/remplissage selon échelle de déploiement d'un TAD.....	213
Graphique 8. Diminution des émissions unitaires avec l'augmentation de la fenêtre de temps selon l'échelle de déploiement du TAD.....	215
Graphique 9. Diminution du nombre de véhicules utilisés avec l'augmentation de la fenêtre de temps selon l'échelle de déploiement du TAD (%).....	216
Graphique 10. Variation des différentes performances des TAD avec l'augmentation de la fenêtre de temps	217
Graphique 11. Diminution des émissions unitaires avec la montée en charge selon l'échelle de déploiement du TAD	219
Graphique 12. Variation de différentes performances des TAD avec la montée en charge	220
Graphique 13. Diminution des émissions unitaires avec la montée en charge (a) et la fenêtre de temps (b).....	222
Graphique 14. Impact de la fenêtre de temps (a) et de la montée en charge (b) sur les émissions unitaires – réseau d'Avignon	227
Graphique 15. Diminution des émissions unitaires selon la fenêtre de temps (a) et en fonction de la montée en charge (b).....	227
Graphique 16. Comparaison des quantités de polluants émises selon le mode de transport.....	232
Graphique 17. Comparaison des distances parcourues pour une même demande de déplacements selon le mode de transport.....	232
Graphique 18. Émissions unitaires selon la fenêtre de temps sur un territoire non-polarisé.....	233
Graphique 19. Évolution du nombre de véhicules selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)	257
Graphique 20. Variation du taux de regroupement selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)	257
Graphique 21. Évolution du remplissage de véhicules selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)	258
Graphique 22. Variation du temps supplémentaire de trajet par client selon la fenêtre de temps (a) et la montée en charge (b)	258

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1. Facteurs d'émission « à chaud » - COPERT IV	243
Annexe 2. Facteurs d'émissions à froid – MEET	250
Annexe 3. Facteurs de surémission à l'accélération.....	251
Annexe 4. Calcul des émissions avec GREEN	243
Annexe 5. Dessin des tournées avec ArcGIS	252
Annexe 6. Résultats simulations Bretagne.....	253
Annexe 7. Graphique complémentaires – Agglomération d'Avignon.....	257